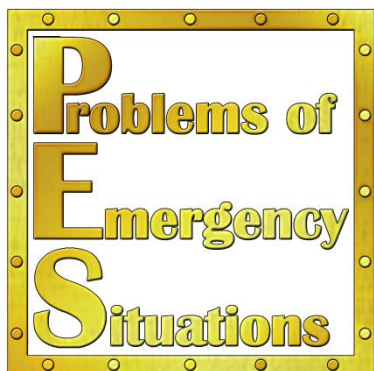




ПРОБЛЕМИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

1(41)2025

Content / Зміст

Цимбал Б. М., Рибка Є. О., Свіржевський П. В., Рибалова О. В., Петрищев А. С. Підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів	4
Басманов О. Є., Карпова Д. І., Гарбуз С. В., Бенедюк В. С., Зазимко О. В. Моделювання теплового потоку від резервуарів з нафтопродуктами, що горять	32
Карпов А. А., Кустов М. В., Корнієнко Р. В., Іваненко О. О., Шаріпова Д. С. Експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів	50
Дурсєв В. О., Бондаренко С. М., Антошкін О. А., Михайловська Ю. В., Маляров М. В., Мурін М. М. Застосування широтно-імпульсної модуляції для управління виконавчим пристроєм адаптивної системи протипожежного захисту	62
Kalchenko Y., Afanasenko K., Oliinyk V., Borsuk O., Kostyrka O. Determination of various types electric lamps parameters in emergency modes of operation	74
Лесько А. С., Кулаков О. В., Катунін А. М., Маладика І. Г. Кінетика хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором	88
Кірсєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Нуязін В. М., Майборода А. О. Вогнегасна ефективність легких сипких матеріалів при гасінні ацетону	100
Трегубов Д. Г., Трефілова Л. М., Даник О. М., Русенко К. О., Мазуров В. С. Використання досвіду пожежогасіння у технології мокрого гасіння металургійного коксу	114
Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A., Goncharenko Y., Melezhyk R. Study of the influence of sodium hexametaphosphate on the properties of silica-containing fireproofing coating for building materials	130
Басманов О. Є., Олійник В. В., Кальченко Я. Ю. Визначення мінімального напору води при її подачі на охолодження резервуара	145
Калиновський А. Я., Куценко Л. М., Сухарькова О. І., Назаренко С. Ю., Дячков О. О., Гринько Ю. М. Моделювання в умовах невагомості розкриття стержневих конструкцій як багатоланкових маятників	162
Майборода Р. І., Отрош Ю. А. Програмна реалізація оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення	177
Ключка Ю. П., Дорошенко Д. О. Математична модель нагрівання балонів з газом «пропан-бутан» у житлових будівлях	194

Наведені результати наукових досліджень зі спеціальностей: цивільна безпека, пожежна безпека, комп'ютерні науки та інформаційні технології, матеріалознавство, хімічні технології та інженерія, телекомунікації та радіотехніка, технології захисту навколишнього середовища, будівництво та цивільна інженерія, озброєння та військова техніка.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Рибка Є. О., д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна) – головний редактор; **Кустов М. В.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна) – заступник головного редактора; **Андронов В. А.**, д.т.н., професор, Заслужений діяч науки і техніки, НАНГ України, Харків (Україна); **Баскін О. М.**, к.т.н., Університет Ньюкасла, Ньюкасл-апон-Тайн (Велика Британія); **Басманов О. Є.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Говаленков С. С.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Дадашов І. Ф.**, д.т.н., доцент, Академія МНС Азербайджанської Республіки, Баку (Азербайджан); **Данченко Ю. М.**, д.т.н., професор, НАНГ України, Харків (Україна); **Дубінін Д. П.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Дурсєв В. О.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Журавський М. М.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Зайцев Р. В.**, д.т.н., доцент, НТУ «ХП», Харків (Україна); **Землянський О. М.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Кірсєв О. О.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Кириченко О. В.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Колосков В. Ю.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Кондратенко О. М.**, д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Костенко Т. В.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Лісняк А. А.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Лобойченко В. М.**, д.т.н., професор, Луцький НТУ, Луцьк (Україна); **Магас Н. М.**, к.т.н., доцент, Словацький технологічний університет, Братислава (Словаччина); **Малєєв М. В.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Мелещенко Р. Г.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Мінська Н. В.**, д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Нуєнзін О. М.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Отрош Ю. А.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Пономаренко Р. В.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Сасєнко С. Ю.**, д.т.н., старший науковий співробітник, ННЦ ХФТІ, Харків (Україна); **Семко В. О.**, д.т.н., професор, Познанський технологічний університет, Познань (Польща); **Собина В. О.**, к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Трефілова Л. М.**, д.ф.-м.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Тютюнник В. В.**, д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Христин О. В.**, к.т.н., доцент, НТУ «ХП», Харків (Україна); **Шаршанов А. Я.**, д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Юрченко В. О.**, д.т.н., професор, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, Харків (Україна); **Ємен Фатіг Махмет**, д.х.н., професор, Університет Мехмета Акіфа Ерсоя, Бурдур (Туреччина); **Фуміан Франческа**, PhD, Римський університет Тор Вергата, Рим (Італія); **Малізія Андреа**, PhD, Римський університет Тор Вергата, Рим (Італія); **Мугавєро Роберто**, PhD, Університет Республіки Сан-Маріно, Сан-Маріно (Італія); **Муландане Фернандо Чаниссо**, PhD, Університет Едуардо Мондлане, Мапуту (Мозамбик); **Тєлак Оксана**, д.т.н., Головна школа пожежної служби, Варшава (Польща).

Видання засновано у 2005 році

Виходить 2 рази на рік

Засновник і видавець

Національний університет
цивільного захисту України

Технічний редактор

Михайловська Ю. В., PhD

Адреса

вул. Онопрієнка, 8,
Черкаси, 18034

Контактна інформація

Tel.: +38 (0472) 55-09-53

Website: <http://pes.nuczu.edu.ua>

E-mail: pes@nuczu.edu.ua

Зареєстровано в Реєстрі медіа: ідентифікатор – R30-01743

Рішення Напрати України з питань
ТБ і РМ № 1315 від 09.11.2023
(Протокол № 26)

Включено до Переліку наукових фахових видань, категорія «Б»

Накази МОН України:
№ 975 від 11.07.2019;
№ 1301 від 15.10.2019;
№ 1643 від 28.12.2019;
№ 409 від 17.03.2020

Індексується

- Index Copernicus
- Ulrich's Periodicals Directory
- Academic Research Index
- Google Scholar
- Road
- Title Doi
- Crossref
- Fatcat

Затверджено до друку

Протокол засідання
вченої ради НУЦЗ України
№ 12 від 27.05.2025

Підписано до друку

27.05.2025

Формат 60x84/16

Папір 80 г/м²

Ум. друк. арк. 11,3

Тираж 100 прим.

Вид. № 23/25

© Національний університет
цивільного захисту України, 2025

The results of scientific research in the specialties: Civil Security, Fire Safety, Computer Science and Information Technology, Materials Science, Chemical Technologies and Engineering, Telecommunications and Radio Engineering, Environmental Protection Technologies, Construction and Civil Engineering, Weapons and military equipment.

EDITORIAL BOARD

Rybka Evgeniy, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine) – Editor in Chief; **Kustov Maksym**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine) – Deputy Editor in Chief; **Andronov Volodymyr**, DSc, Professor, Honored Worker of Science and Technology, The National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv (Ukraine); **Buskin Olga**, PhD, Newcastle University, Newcastle upon Tyne (Great Britain); **Basmanov Oleksii**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Hovalenkov Serhii**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Dadashov Ilgar**, DSc, Associate Professor, Academy of the ministry of Emergency Situations of Azerbaijanian Republic, Baku (Azerbaijan); **Danchenko Yuliya**, DSc, Professor, The National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv (Ukraine); **Dubin Dmytro**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Dureev Viatcheslav**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Zhuravskij Maxim**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Zaitsev Roman**, DSc, Associate Professor, NTU «KhPI», Kharkiv (Ukraine); **Zemlianskyi Oleh**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Kireev Oleksandr**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Kyrychenko Oksana**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Koloskov Volodymyr**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Kondratenko Oleksandr**, DSc, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Kostenko Tetiana**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Lisniak Andrii**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Loboychenko Valentyna**, DSc, Professor, LNTU, Lutsk (Ukraine); **Mahas Nataliia**, PhD, Associate Professor, Slovak University of Technology, Bratislava, (Slovakia); **Maliarov Murat**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Meleshchenko Ruslan**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Minska Natalia**, DSc, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Nuianzin Oleksandr**, DSc, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Otrosh Yurii**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Ponomarenko Roman**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Sayenko Serhii**, DSc, Senior Researcher, NSC KIPT, Kharkiv (Ukraine); **Semko Volodymyr**, DSc, Professor, Poznan University of Technology, Poznan (Poland); **Sobyna Vitaliy**, PhD, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Trefilova Larysa**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Tiutiunyk Vadym**, DSc, Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Khrystych Olena**, PhD, Associate Professor, NTU «KhPI», Kharkiv (Ukraine); **Sharshanov Andriy**, DSc, Associate Professor, NUCPU, Cherkasy (Ukraine); **Iurchenko Valentyna**, DSc, Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv (Ukraine); **Emen Fatih Mehmet**, DSc, Professor, Mehmet Akif Ersoy University, Burdur (Turkey); **Fumian Francesca**, PhD, University of Rome Tor Vergata, Rome (Italy); **Malizia Andrea**, PhD, University of Rome Tor Vergata, Rome (Italy); **Mulandane Fernando Chanisso**, PhD, Eduardo Mondlane University, Maputo (Mozambique); **Telak Oksana**, DSc, Main School of Fire Service, Warsaw (Poland).

The issue was founded in 2005

It comes out twice a year

Founder and Publisher
National University of Civil
Protection of Ukraine

Technical editor
Yuliia Mykhailovska, PhD

Address
Onopriienko Str., 8,
Cherkasy, Ukraine, 18034

Contact information
Tel.: +38 (0472) 55-09-53
Website: <http://pes.nuczu.edu.ua>
E-mail: pes@nuczu.edu.ua

Registered in the Media Register:
identifier – R30-01743

Decision of the National Council of
Ukraine on TV and RB № 1315 of
09.11.2023 (Minutes № 26)

Included in the List
Scientific Professional
Publications, category «B»
Orders of the Ministry of Education
and Science of Ukraine:
№ 975 dated 11.07.2019;
№ 1301 dated 15.10.2019;
№ 1643 dated 28.12.2019;
№ 409 dated 17.03.2020

Journal Indexing
■ Index Copernicus
■ Ulrich's Periodicals Directory
■ Academic Research Index
■ Google Scholar
■ Road
■ Title Doi
■ Crossref
■ Fatcat

Approved for printing
Minutes of the meeting
Academic Council
for NUCPU
№ 12 dated 27.05.2025

Signed for print
27.05.2025

Format 60x84/16
Paper 80 g/m²
Condit. print. sheet. 11,3
Circulation 100 cop.
Publ. № 23/25

© National University of Civil
Protection of Ukraine, 2025

УДК 349.2

Б. М. Цимбал¹, д.держ.упр., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0002-2317-3428)

Є. О. Рибка¹, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-5396-5151)

П. В. Свіржевський¹, здобувач вищої освіти (ORCID 0009-0004-2463-5841)

О. В. Рибалова¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-8798-4780)

А. С. Петрищев², к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-2631-1723)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ РОБОТІВ ТА МАНІПУЛЯТОРІВ

Дослідження зосереджене на розробці методики підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів у промисловому середовищі. Роботизовані системи ефективно виконують складні та небезпечні завдання, але водночас створюють нові ризики для працівників, що потребує систематичної оцінки та управління. Було проведено аналіз основних факторів, які впливають на безпеку роботизованих систем, зокрема механічні, ергономічні, термічні та електричні небезпеки. На основі цього розроблено універсальну методику оцінки професійних ризиків, яка враховує тяжкість можливих ушкоджень, ймовірність їх виникнення, кваліфікацію персоналу, швидкість настання небезпеки та рівень обізнаності працівників. Методика включає розроблені чек-листи, матриці оцінки ризиків та анкети для ідентифікації небезпечних факторів та визначення рівня ризиків. Для перевірки її ефективності було проведено апробацію на машинобудівному підприємстві, де оцінено ризики для працівників, які працюють із вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та зварювальним роботом ABB IRB 1400 M94A. Було встановлено, що найбільш небезпечним робочим місцем є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A, бо він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпека та небезпекою випромінювання, найбільше значення має ризик при контакті оператора з струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий). Результати показали ключові ризики на робочих місцях, а також ефективність розроблених заходів із їх мінімізації. Запроваджено навчання персоналу, обмеження доступу до небезпечних зон та використання засобів індивідуального захисту. Методика може бути застосована для ідентифікації ризиків та впровадження заходів безпеки на підприємствах різних галузей.

Ключові слова: професійні ризики, безпека праці, коботи, роботи, маніпулятори, штучний інтелект

1. Вступ

Впровадження промислових роботів та маніпуляторів може неоднозначно впливати на безпеку, професійне здоров'я та благополуччя працівників [1]. Роботи та штучний інтелект радикально змінюють роль працівників у виробничому процесі [2]. Промислові роботи та маніпулятори зазвичай використовувалися для фізично інтенсивних та небезпечних завдань, які часто пов'язані з шкідливим впливом на професійне здоров'я та підвищеним ризиком нещасних випадків на виробництві [3]. Роботи також можуть запобігти численним небезпекам у надзвичайних ситуаціях, таких як розливи хімікатів [1]. Роботи також можуть мінімізувати ризики, пов'язані з помилками людини [4]. З іншого боку, роботи можуть становити небезпеку для працівників. Складна взаємодія між людьми та роботами може мати шкідливий вплив на психічне здоров'я працівників. Використання спільного робочого простору з людьми, може призвести до додаткових ризиків для безпеки [1–3].

Підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів, зокрема удосконалення етапу оцінки професійних ризиків, має вагоме значення для підвищення ефективності функціонування підприємства, стабільного виробництва та забезпечення безпеки працівників.

Тому, підвищення рівня безпеки роботів та маніпуляторів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасне виробництво характеризується взаємодоповнюваністю між людьми та автоматизацією. Тому необхідно розробляти й впроваджувати нові методи та інструменти для проєктування та реалізації спільних робочих місць, які забезпечують безпеку, ергономіку та ефективність. У контексті HRC (взаємодії людини та робота) люди й коботи працюють разом для досягнення ефективності [2]. Коботи забезпечують небезпечні, вимогливі та швидкі завдання, люди можуть працювати понад свої фізичні обмеження [3]. Існує значна кількість літератури з ергономіки для HRC-системи, але вона більше зосереджена на технологічних аспектах коботів, таких як сенсорні системи, системи позиціонування та розпізнавання [4–6]. Однак ергономіка є вторинним аспектом застосування безпеки в HRC. Ергономіка була представлена в різних способах: одні автори оцінювали цей аспект за витратами на енергію, а інші – у контексті уникнення незручних поз та підйому важких вантажів під час роботи з роботами [7–10]. Найефективніший підхід, який враховує ефективність лінії та рівень ергономічного ризику, – це розгляд факторів, таких як тривалість циклу й кількість станцій, а також фактори ризику для ергономіки під час балансування складної лінії [11–13].

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в ергономіці має значний потенціал для покращення здоров'я та безпеки на робочому місці, оптимізації продуктивності працівників та зменшення частоти порушень опорно-рухового апарату. Системи комп'ютерного зору на базі ШІ можуть точно визначати та аналізувати пози працівників, виявляючи ергономічні ризики в режимі реального часу. Це дозволяє впроваджувати профілактичні заходи для запобігання травмам та сприяння здоровим робочим звичкам [14]. Дослідження показують, що системи виявлення втоми на основі ШІ можуть підвищити уважність та пильність працівників, що призводить до зменшення рівня аварій [15]. Програмне забезпечення на основі ШІ можна використовувати для проєктування та оптимізації робочих місць з урахуванням антропометрії працівників і конкретних вимог завдань. Це допомагає запобігати незручним позам, зменшувати м'язову напругу, покращувати комфорт та продуктивність [16, 17]. Однак впровадження ШІ в ергономіку не позбавлене викликів. Етичні аспекти, питання конфіденційності і необхідність створення прозорих та підзвітних систем ШІ мають бути пріоритетними. Важливо знайти баланс між використанням потужності ШІ для ергономічних удосконалень та вирішенням цих етичних питань для відповідального впровадження технологій.

Важливим аспектом є обмеження прикладених сил та тиску з боку роботів у межах допустимих для людського організму, щоб запобігти серйозним травмам. Поведінка робота має бути адаптивною до змін та повторного планування його траєкторії в непередбачуваних критичних ситуаціях. Основним ризиком у поточних впровадженнях HRC є відсутність детермінованих випадків – оскільки людина може уповільнити або зупинити робота, є ймовірність, що певні часові цикли не можуть бути дотримані [18]. Оскільки людина зазвичай необмежена у робочому просторі, існує вірогідність виникнення нових небезпечних ситуацій, які раніше не враховувалися [19].

Існує методика RULA (Rapid Upper Limb Assessment) для оцінки професійного ризику опорно-рухового апарату, пов'язаного із завданнями зі складання. Виходячи з проведеного дослідження, впровадження роботів-коллаборантів у виробничий процес може суттєво покращити умови праці, усуваючи найкритичніші завдання, наприклад, нанесення клею, які можуть призвести до травм. Civil Security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-1

розладів, розтягнення м'язів спини та шиї [20], але дана методика є вузькоспеціалізованою враховує тільки ергономічні ризики та не враховує ризики для самих роботів.

ISO/TR 14121-2:2012 містить практичні вказівки щодо оцінки професійного ризику, ISO 10218-1:2011, ISO 13849-1:2015 та Європейська директива з машинобудування 2006/46ЄС описують процедури оцінки ризиків робочого місця та його окремих компонентів [21], але вони не в повній мірі враховують взаємодію людини з роботом, робота з людиною та робота з роботом, робота з ін. машиною чи обладнанням.

Існують дослідження, автори яких вимірювали показники безпеки та гнучкості в робототехніці, однак вони не враховують оцінку показників безпеки та гнучкості у фазі роботи кобота [22]. Крім того, більшість досліджень, що враховували ергономічність, безпеку та гнучкість, застосовували лише якісні критерії оцінювання [23]. Існує потреба в нових кількісних підходах, здатних одночасно виміряти ергономічність, безпеку та гнучкість системи спільного робочого середовища на всіх етапах процесу виготовлення або складання.

Оцінка професійних ризиків повинна враховувати вплив роботів та технологій штучного інтелекту (ШІ) на людей, крім фізичних, механічних або хімічних, ще й кіберзагрози та психологічні ризики. Оцінка професійних ризиків повинна враховувати взаємодію (фізичну та соціальну), психосоціальну, кібербезпеку часову та соціальну [24, 25]. Тому необхідно розробити методику оцінки професійних ризиків, яка б враховувала зростаючі можливості роботів та штучного інтелекту, включаючи взаємодію людини та робота.

Перспективними є дослідження з безпеки та гігієни праці в галузі складування, сільського господарства, гірничодобувної промисловості та будівельних роботів; ЗІЗ для робітників біля колаборативних роботів та спільна робота з кількома роботами [26]. У промисловому середовищі запобігання контакту без бар'єрів і огорож зазвичай базується на впровадженні вдосконалених систем датчиків та стратегій контролю; контакти повинні бути виявлені – можливо, передбачені – та пом'якшені внутрішніми функціями безпеки та заходами захисту. Координація людей і роботів має відповідати ергономічним принципам, щоб зменшити фізичне та розумове навантаження та підтримувати синергетичну співпрацю [27].

Людина повинна відчувати себе в безпеці під час співпраці з роботом. Відчуття безпеки можна досягти, довіряючи роботу, системі і, по суті, алгоритмам, які розроблені для HRC. Рівень ефективності може бути досягнутий шляхом безпечної співпраці, коли людина-працівник не відчуває небезпеки. Довіру можна заслужити за допомогою зрозумілих та передбачуваних дій робота, які повинні бути вирішені за допомогою розумного двонаправленого зв'язку між людиною і роботом. Однак навіть невеликі аварії можуть стати причиною обґрунтованої втрати довіри до роботизованих систем [28].

Існує шість основних факторів, які впливають на сприйняття безпеки, а саме: контекст використання роботів, комфорт, досвід та знайомство з роботами, довіра, відчуття контролю над взаємодією, прозорі та передбачувані дії роботів. Ці фактори можуть допомогти кількісно оцінити взаємодію з роботами та особливості їх конструкції, що потенційно може покращити сприйняття безпеки. Виявлені особливості також можуть допомогти кількісно оцінити сприйняття безпеки, що дозволить роботам адаптувати свою поведінку для пом'якшення психологічної шкоди [29, 30].

Сучасні роботи повинні бути запрограмовані з врахуванням вимог стандартів безпеки ЄС [31]. У траєкторії руху робота можна імітувати безпечну взаємодію. При цьому швидкість робота можна зменшити перед зіткненням з людиною, що ось-ось станеться, і це може бути мінімізація ризику зіткнення або зменшення шкоди від ризику [32].

Відповідно до стандарту ISO 10218–2, повинні бути проведена оцінка професійних ризиків перед введенням в експлуатацію промислових роботизованих систем, то б то ще на етапі їх проектування. У сучасній промисловій практиці оцінка професійних ризиків проводиться на основі досвіду, експертних знань та простих інструментів, таких як чек-листи. Однак нещодавня тенденція до співпраці людини та робота (HRC) значно збільшує складність роботизованих систем та ускладнює оцінку професійних ризиків, існуючі методики їх оцінки не відповідають сучасним потребам [33].

Для ідентифікації та оцінки ризиків використовуються методики оцінки професійних ризиків ISO 12100 [34] та 4M [35], але дані методики є не ефективними, бо враховують тільки фізичні фактори та не враховують психологічні та організаційні. Що обумовлює необхідність розширення масштабів оцінки ризиків робіт, щоб включити інші фактори небезпеки, окрім фізичних. До цих критичних факторів відносяться особистісні фактори операторів з рисами характеру, психологією та спілкуванням; пов'язані з роботою елементи з умовами роботи, роботою для психологічного клімату, організацією тощо; і системні фактори, а саме цілісність програмного забезпечення та кібербезпека.

Довготривалі небезпеки та наслідки хронічних станів та травм на робочих місцях робітників, таких як втрата слуху, гіперчутливість шкіри, вібрація, також є одним із напрямів для проведення досліджень факторів небезпеки робототехнічних завдань та травм операторів. Дві третини травм, спричинених нещасними випадками робітників, викликають психологічні та особисті риси робот-операторів [35].

Оцінка ризиків є одним із важливих процесів соціального впровадження робітників. При оцінці ризиків та проектуванні безпеки систем за участю різних зацікавлених сторін моделювання та візуалізація пов'язаних елементів важливі не лише для розробників, але й для користувачів. Через різноманітність сервісних робітників оцінка ризику в табличній формі стає складною та вимагає додаткових пояснень, тому для ефективного визначення потенційних проблем застосовується розширення SafeML, яке є інструментом для уніфікованої оцінки ризиків різноманітних сервісних робітників [36]. Але недоліком даної методики є складність застосування, адаптування під зміни умови використання, вона не є універсальною.

Поточні норми та стандарти вимагають оновлення оцінки ризиків для кожної зміни в роботизованому застосуванні, включаючи задіяні деталі, роботизовані компоненти та тип взаємодії в робочому просторі. Існує програмний інструмент аналізу ризиків, який слугує для підтримки управління змінами для адаптивних колаборативних роботизованих систем у моделі підключеної фабрики. Інструмент здатний автоматично визначати, де були внесені зміни в компоненти або процеси в рамках конкретної програми за допомогою його інтеграції з підключеною заводською архітектурою та дозволяє оновлювати оцінку ризиків. Але даний інструмент має значну кількість помилок упущення, спрацювань та є складним у використанні, необхідно коригувати графічний інтерфейс, збільшувати розмір поля з текстом, щоб відображати весь текст без потреби бічного прокручування [37].

Інструментам моделювання та тестування оцінки ризиків RA бракує реалістичності.

тичності через спрощені моделі, обмежену динамічну реалістичність та обмеження інтеграції датчиків. Штучний інтелект (ШІ) може покращити методи оцінки ризиків. Перевагами інтеграції ШІ є систематична ідентифікація збоїв процесів, ретельна ідентифікація небезпек, моделювання складних систем, а недоліками – обмежене охоплення динаміки людина-робот, залежність від історичних даних, обмеження адаптивності, інтенсивність ресурсів, залежність від дизайну, складність, контроль за людським фактором, залежність від даних у вирішенні ризиків, пов'язаних з HRC. Дотримання стандартів значно підвищує надійність оцінки ризиків на основі штучного інтелекту, забезпечуючи узгоджені та перевірені результати за різними сценаріями HRC [38].

Комбінацію FMEA та аналіз краватку-метелик застосовують для ранньої оцінки безпеки співпраці людини та робота на прикладі промислового випадку з виробничої сфери. Інтеграція аналізу метелика з розрахунком RPN від FMEA дає можливість оцінити ризики в середовищах HRC. Поєднуючи низхідну візуалізацію та деталізацію аналізу краватки-метелика з нижньою класифікацією рівня ризику за допомогою розрахунку RPN, можна систематично визначати, аналізувати та розглядати потенційні небезпеки в процесі спільної роботи людини та робота [39]. Але дана інтеграція методів не дає можливість кількісно оцінити ризики.

Через труднощі зі збором випадків травм у реальному житті інтелектуальних сервісних роботів неможливо використати наявну інформацію про травми для побудови їх сценаріїв, необхідних для оцінки ризику. Тому експерименти проводять у віртуальній реальності для перевірки та підтвердження джерел шкоди, з метою покращення наукового визначення ймовірності та тяжкості травм, пов'язаних із безпекою продукту, використовується метод ваги, щоб присвоїти різні ваги ймовірності та тяжкості виникнення травм. При цьому здійснюється оцінка тяжкості травм на основі експериментів з моделюванням, оцінка тяжкості травм на основі анкет опитування споживачів та оцінка тяжкості травм на основі експертної оцінки [40]. Але недоліком цього методу є те, що коефіцієнти ваги споживачів та досліджень експертів є рівними, коефіцієнт ваги досліджень з моделювання є більшим ніж досліджень експертів.

Необхідно переосмислити режими безпеки та спільної роботи людини та робота, щоб змоделювати співпрацю з роботами та розглядати їх як справжніх співробітників. При цьому методика оцінки ризиків може передбачати такі критерії: тяжкість травми, частота впливу ризику та можливість уникнення ризику. Результатом оцінки є необхідний рівень ефективності, якому повинні відповідати окрема функції безпеки або заходи безпеки, необхідні для мінімізації ідентифікованих ризиків [41].

Методи аналізу ризиків, такі як HAZOP та STPA, довели свою ефективність забезпечення безпеки системи протягом багатьох років. Однак розмірність та невідомість людського фактора багатьох допоміжних робототехнічних додатків ставить під сумнів здатність цих методів забезпечувати всебічне висвітлення питань безпеки з міждисциплінарної точки зору своєчасно та економічно ефективним способом. Завдання з фізичною допомогою, в яких цілий ряд динамічних контекстів вимагає постійної фізичної взаємодії людини та робота, такі як, наприклад, одягання за допомогою робота або сидіння і стояння, представляють нову парадигму безпечного проектування та методології аналізу безпеки [42].

Роботи, що працюють у небезпечному середовищі, повинні вміти оцінювати пов'язані з цим ризики перед виконанням будь-якого заданого завдання. Хоча в

такому сценарії можна врахувати кілька ризиків, ризики, засновані на умовах навколишнього середовища, рідко досліджуються. Робот повинен коригувати свій шлях, щоб врахувати небезпеки, з якими він може зіткнутися. Робот повинен переміщатися в ядерному середовищі, оптимізуючи свій шлях, щоб уникнути зон з високим рівнем радіації та високою температурою [43].

Існують модель оцінки ризиків краватка-метелик, що включає принципи EN ISO 12100 та надає можливості уникнення небезпек, яка дозволяє здійснити комплексну оцінку ризику потенційного зіткнення людини-оператора з «рукою робота» з урахуванням чотирьох груп небезпечних факторів: фізичних, організаційних, психосоціальних та інформаційних [44].

Оцінка потенційних ризиків, які зварювальні роботи становлять для людей повинна бути для навколишнього середовища. Зварювальні роботи потенційно можуть становити значний ризик для здоров'я та безпеки людей, особливо якщо їх неправильно встановити, обслуговувати та експлуатувати. Тому дослідження повинні бути зосереджені на розробці більш комплексних методологій оцінки ризиків, які враховують не тільки фізичні небезпеки, пов'язані зі зварювальними роботами, але їх вплив на навколишнє середовище та потенційні довгострокові наслідки для здоров'я працівників [45].

Метод Вільяма Файна застосовують для того, щоб оцінити рівні ризику та визначити пріоритетність заходів під час сумісної роботи робота та людини. Методологія оцінки ризиків за активної участі працівників включає сприйняття працівників існуючих небезпек на їх робочих місцях. Оцінка ризиків на робочих місцях може включати стратегію участі з додатковими методологіями до методу Вільяма Файна (наприклад, статистичний контроль) [46].

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка методики оцінки професійних ризиків, що дозволить підвищити рівень безпеки роботів та маніпуляторів.

Досягнення зазначеної мети ґрунтується на реалізації наступних завдань:

- розробити методику оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами;
- апробувати (випробувати) розроблену методику оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами і маніпуляторами на машинобудівному підприємстві та розробити заходи з управління професійними ризиками.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є рівень безпеки роботів та маніпуляторів. Предметом дослідження є розробка методики оцінки професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами. Гіпотеза дослідження – розробка методики оцінки професійних ризиків дозволить підвищити рівень безпеки роботів та маніпуляторів. Аналіз методів оцінки професійних ризиків при взаємодії з роботами та маніпуляторами надає можливість виявити їх недоліки та надати рекомендації щодо їх вдосконалення. Випробування розробленої методики оцінки професійних ризиків при роботі з роботизованим вимірювальним та зварювальним обладнанням машинобудівного підприємства підтвердить її ефективність та точність у практичному застосуванні. Тому, розроблена методика оцінки професійних ризиків роботів та маніпуляторів може стати важливим інструментом для ідентифікації і оцінки специфічних ризиків, розробки та реалізації заходів, які підвищать рівень безпеки промислових роботів та маніпуляторів.

З метою перевірки гіпотез, вирішення дослідницьких завдань була використана система прийомів та способів таких, як метод абстрагування, аналізу й синтезу, порівняння, спостереження та експертний метод оцінки професійних ризиків.

Дослідження проводили із застосуванням роботизованого обладнання: вимірювальної руки Absolute Arm 7-Axis, координатно-вимірювальної машини GLOBAL S GREEN 05.07.05 та зварювального робота ABB IRB 1400 M94A. Для аналізу і обробки експериментальних даних було застосовано персональний комп'ютер. Для обробки та аналізу результатів даних випробування, розробки чек-листа та анкети оцінки ризиків працівників від роботизованого обладнання використовувалась програма, табличний процесор Microsoft Office Excel.

5. Розробка універсальної методики оцінки професійних ризиків

Більшість методик з оцінки професійних ризиків враховують тільки важкість шкоди до якої може призвести конкретна небезпека та можливість виникнення цієї шкоди.

Крім цього більшість методик не передбачають врахування поширювання шкоди на кілька осіб, тобто настання групового нещасного випадку.

Також більшість методик не враховує нараження осіб на небезпеку, надійність обладнання, хроніку шкоди для здоров'я та нещасних випадків, порівняння ризиків, можливість усунення чи обмеження шкоди, швидкість настання шкоди та людський чинник. Крім того необхідно враховувати не тільки механічні, електричні, термічні небезпеки, утворювані шумом, спричинені вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційні, ергономічні небезпеки, які пов'язані з середовищем у якому використовується роботи і маніпулятори, а також комбінація небезпек. Методики оцінки ризиків є вузьконаправленими, бо враховують тільки ризики на певному робочому місці та не враховують небезпеки для самих роботів та маніпуляторів, а також небезпеки, які виникають при взаємодії з іншими пристроями та системами, то б то небезпеки до оточуючого середовища роботів та маніпуляторів, крім людини.

Для розроблення методики оцінки ризиків, які виникають при взаємодії людини, робота та навколишнього середовища було враховано вимоги міжнародних та європейських стандартів: ДСТУ EN ISO 10218-1:2018 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 1. Роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT); ДСТУ EN ISO 10218-2:2018 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності промислових роботів. Частина 2. Роботизовані системи та їхні поєднання (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT) та ДСТУ EN ISO 12100:2016 Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) [47–49].

Ризик, який пов'язаний з певною небезпечною ситуацією, залежить від тяжкості шкоди та можливості виникнення цієї шкоди (рис. 1).

В свою чергу важкість шкоди, до якої може призвести конкретна небезпека є функцією важкості травми або шкоди для здоров'я працівників та поширювання шкоди. Можливість виникнення шкоди є функцією нараження осіб на небезпеки, виникнення небезпечної події та можливість усунення чи обмеження шкоди. Можливість усунення чи обмеження шкоди є функцією кваліфікації працівників, швидкості небезпечної ситуації, яка може призвести до шкоди, обізнаності працівників із ризиком, можливістю людини уникнути шкоди чи обмеження, практичний досвід та знання.

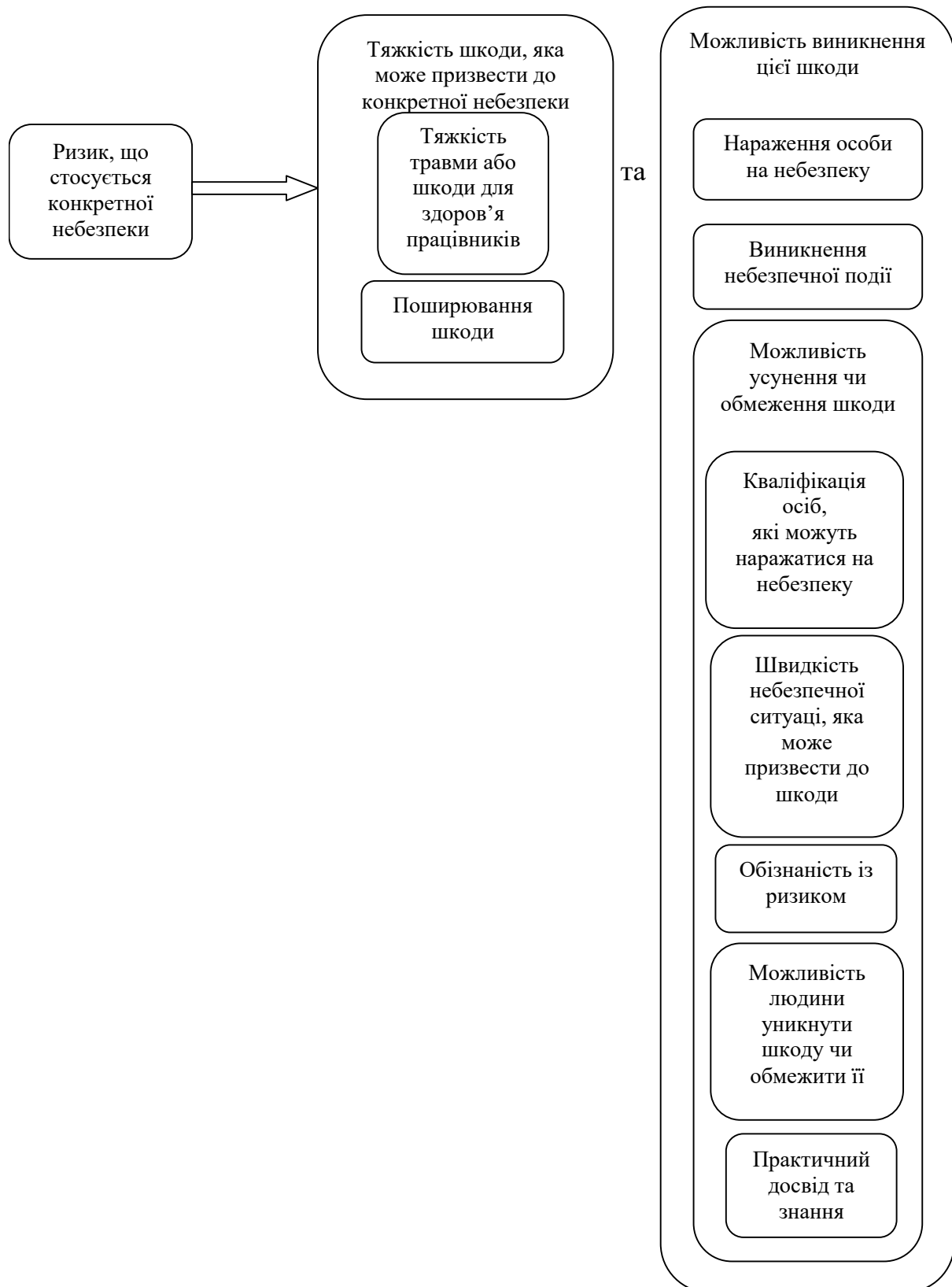


Рис. 1. Елементи ризику

Рівень професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами можливо визначити за формулою:

$$R = B \cdot P, \quad (1)$$

де В – тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки; Р – можливість виникнення цієї шкоди.

Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки:

$$B = N + K, \quad (2)$$

де N – тяжкість травми або шкоди для здоров'я; K – поширювання шкоди.

Тяжкість травми або шкоди для здоров'я може бути: незначною 1, серйозною 2 або смертельною 3. При цьому поширення шкоди може бути на одну особу 1 або кілька осіб, тобто груповий нещасний випадок 2.

Можливість виникнення цієї шкоди:

$$P = V + I + U, \quad (3)$$

де V – нараження осіб на небезпеку, I – виникнення небезпечної події та U – можливість усунення чи обмеження шкоди.

Нараження осіб на небезпеку, яка впливає на ймовірність виникнення шкоди залежить від таких чинників: необхідність доступу в небезпечну зону (для нормальної роботи, виправлення помилок, обслуговування або ремонту тощо), при цьому якщо виникає потреба тоді 1, якщо ні – 0; характеру доступу (наприклад ручне видалення матеріалу), якщо виконується ручна праця тоді 1, якщо ні – 0; часу перебування в небезпечній зоні, при цьому якщо людина довго перебуває в небезпечній зоні тоді 1, якщо не довго 0; кількості осіб, які потребують доступ, якщо багато тоді 1, якщо ні – 0 та частоти доступу, якщо частий доступ 1 та нечастий 0.

Виникнення небезпечної події, яка впливає на ймовірність шкоди залежить від таких чинників: надійності та інших статистичних даних, якщо не надійно, то 1, якщо надійно – 0; хроніка нещасних випадків, якщо нещасні випадки повторюються 1, якщо ні – 0; хроніка щодо шкоди для здоров'я, якщо спостерігається 1, якщо ні 0; порівняння ризиків, наприклад у разі використання роботів та маніпуляторів з однаковими властивостями, необхідно враховувати відповідність стандартним вимогам, правильність використання та ін., якщо вони не відповідають стандартним вимогам, неправильно експлуатуються або використовуються не за призначенням, то 1, якщо все відповідає тоді 0.

Можливість усунення чи обмеження шкоди визначається за формулою:

$$U = Q + T + O + D + Z, \quad (4)$$

де Q – кваліфікація осіб; T – швидкість настання шкоди; O – обізнаність із ризиком; D – можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її; Z – практичний досвід та знання.

Можливість усунення чи обмеження шкоди залежить від таких чинників: кваліфікація осіб, якщо особи не кваліфіковані – 1, якщо кваліфіковані 0; швидкість настання шкоди: одразу 3, швидко 2, повільно 1; обізнаність із ризиком: працівник знає загальну інформацію про робота чи маніпулятора, зокрема інформацію для користувача 0, не знає – 1, виконував безпосереднє спостереження 0, якщо ні 1, знає застережні знаки та індикатори, зокрема на машині 0, якщо не знає 1; можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її, наприклад рефлекс, жвавість або можливість втечі 0, якщо не має 1; практичний досвід та знання: щодо робота або маніпулятора 1, щодо подібних роботів чи маніпуляторів 2, відсутній досвід 3.

Якщо врахувати формули (2), (3) та (4), тоді професійний ризик можливо визначити за формулою:

$$R = (N + K)(V + I + Q + T + O + D + Z), \quad (5)$$

Для спрощення проведення розрахунків з визначення професійного ризику необхідно користуватися розробленим чек-листом (табл. 1) та матрицею (табл. 2).

Табл. 1. Чек-лист для визначення величини професійного ризику

Критерій оцінювання	Величина критерію оцінювання										
Тяжкість травми або шкоди для здоров'я, N	незначна 1			серйозна 2				смертельна 3			
Поширення шкоди, K	одна особа 1					кілька осіб 2					
Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки, B=N+K	2		3			4			5		
Необхідність доступу в небезпечну зону	ні, 0					так, 1					
Характер доступу (ручна праця)	ні, 0					так, 1					
Часу перебування в небезпечній зоні (довго)	ні, 0					так, 1					
Кількості осіб, які потребують доступ (багато)	ні, 0					так, 1					
Частота доступу (часто)	ні, 0					так, 1					
Нараження осіб на небезпеку, V (сумарне значення «так»)	0	1	2	3	4	5					
Надійність (ненадійний)	ні, 0					так, 1					
Хроніка нещасних випадків (спостерігається)	ні, 0					так, 1					
Хроніка щодо шкоди для здоров'я (спостерігається)	ні, 0					так, 1					
Порівняння ризиків (не відповідають стандартним вимогам, неправильно експлуатуються або використовуються не за призначенням)	ні, 0					так, 1					
Виникнення небезпечної події, I (сумарне значення «так»)	0	1	2	3	4						
Кваліфікація осіб Q	кваліфіковані 0					некваліфіковані 1					
Швидкість настання шкоди T	повільно 1					швидко 2			одразу 3		
Працівник знає загальну інформацію про роботу чи маніпулятора, зокрема інформацію для користувача	так,0					ні, 1					
Виконував безпосереднє спостереження	так,0					ні, 1					
Знає застережні знаки та індикатори, зокрема на машині	так,0					ні, 1					
Обізнаність із ризиком, O (сумарне значення «ні»)	0		1	2			3				
Можливість людини обмежити шкоду чи уникнути її, наприклад рефлекс, жвавість або можливість втечі, D	так,0					ні, 1					
Практичний досвід та знання, Z	щодо робота або маніпулятора 1			щодо подібних робіт чи маніпуляторів 2				відсутній досвід 3			
Можливість усунення чи обмеження шкоди, U=Q+T+O+D+Z	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Можливість виникнення цієї шкоди, P=V+I+U											
Рівень професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами, R=B·P											

Табл. 2. Матриця визначення рівня професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами

Можливість виникнення цієї шкоди, Р	Тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки, В			
	2	3	4	5
2	4	6	8	10
3	6	9	12	15
4	8	12	16	20
5	10	15	20	25
6	12	18	24	30
7	14	21	28	35
8	16	24	32	40
9	18	27	36	45
10	20	30	40	50
11	22	33	44	55
12	24	36	48	60
13	26	39	52	65
14	28	42	56	70
15	30	45	60	75
16	32	48	64	80
17	34	51	68	85
18	36	54	72	90
19	38	57	76	95
20	40	60	80	100

Рівні професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами поділяються на:

- незначний (зелена зона) – 2–10;
- мінімальний (синя зона) – 12–20;
- помірний (жовта зона) – 21–40;
- суттєвий (помаранчева зона) – 42–60;
- високий (червона зона) – 64–100.

Високий рівень професійного ризику свідчить про недостатню ефективність чинних заходів захисту та нагальну потребу в розробці й впровадженні додаткових рішень для його зниження або мінімізації. Якщо ж рівень ризику є низьким, це свідчить про результативність наявних заходів. У такій ситуації варто продовжувати їх застосування, паралельно здійснюючи моніторинг та регулярну переоцінку ризиків у разі зміни умов.

Для визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами, походження небезпек та їх потенційні наслідки, можливо скористатися розробленою анкетною (табл. 3).

Розроблена методика надає можливість встановити взаєв'язок між нараженням на небезпеку та його результатом, врахувати людські чинники: взаємозв'язок людей із роботом та маніпулятором; взаємодію між людьми; аспекти, пов'язані зі стресом; ергономічні аспекти; спроможність людей щодо обізнаності ризиків у конкретній ситуації, яка залежна від їх навченості, досвіду і здібностей; втоми; аспектів обмежених можливостей (інвалідність, вік тощо).

Крім цього придатності захисних засобів, можливості руйнування чи обмеження заходів захисту, здатності утримання засоби захисту та доступність інформації для користувача.

Табл. 3. Анкета визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами та маніпуляторами, походження небезпек та їх потенційні наслідки

№ небезпеки	Тип або група небезпеки	Походження	Може призвести до небезпеки чи шкоди	Немає небезпеки чи шкоди	Немає даних	Потенційні наслідки
1	Механічні	Рухи (нормальні чи несподівані) будь якої частини робота (включаючи спину)				дроблення;
		Рухи (нормальні чи несподівані) кінцевого ефектора або будь-якої рухомої частини клітини робота				зрізання;
		Переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі				різання або розрізання;
		Несправність кінцевого ефектора (відрив)				заплутаність;
		Переміщення інструменту кінцевого ефектору в положенні обслуговування				втягування або захоплення;
		Ненавмисне переміщення машини або частини роботизованої клітини під час вантажно-розвантажувальних операцій				вплив;
		Падіння або викидання матеріалів і виробів				укол або прокол;
		Ненавмисне переміщення джигів або захвату				
		Ненавмисне вивільнення інструменту				
		Ненавмисне переміщення пов'язаної машини (машин)				тертя, стирання; впорскування або викид рідини/газу під високим тиском
		Маніпуляції з продуктами та матеріалами, включаючи викид				
		Рух або обертання інструменту на кінцевому механізмі				
		Рух частин робота				
		Рух частини з гострим краєм, утримуваною роботом				
		Обертання або переміщення пов'язаної машини чи верстатного інструменту в камері робота				
		Обертальний рух будь-яких осей робота				
		Вільний одяг, довге волосся				
		Між рукою робота та будь-яким нерухомим об'єктом				
		Між кінцевим елементом і будь-яким нерухомим об'єктом (паркан, балка тощо)				
		Неможливість виходу робота камери (через двері камери) для захоплення оператора в автоматичному режимі				

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
		Між світильниками (впадання); між маршрутами, комунікаціями				
		Маніпуляції з продуктами та матеріалами, включаючи викид				
		Переміщення або обертання гострого інструменту на кінцевому механізмі або зовнішніх осях, деталі, що обертається і пов'язаного обладнання				
		Ненавмисний рух кінцевого механізму (специфічний процес для шліфувальних кругів тощо)				
		Ненавмисний рух або активація кінцевого ефектора або пов'язаного обладнання (включаючи зовнішні осі, керовані роботом)				
		Несподіване вивільнення потенційної енергії з накопичених джерел				
2	Електричні	Контакт з струмоведучими частинами або з'єднаннями				ураження електричним струмом; спалення або опік;
		Плутанина різних напруг в системі				вдихання отруйних парів;
		Контакт з окремими компонентами електричної (електронної) схеми, тобто конденсаторами				ураження очей електричним струмом, іскра;
		Вплив дугового спалаху				вплив на кардіостимулятор
		Процес використання високої напруги або високої частоти, наприклад, електростатичне фарбування, індукційне нагрівання				
		Зварювання з використанням високої напруги				
3	Термічні	Гарячі поверхні, пов'язані з кінцевим ефектором; або пов'язане обладнання чи деталь				опіки;
		Холодні поверхні або предмети				пожежа, вибух;
		Вибухонебезпечна атмосфера, спричинена процесом, тобто фарба (розпилені частинки, шліфувальний та фрезерний пил				випромінювання від джерел тепла;
		Вплив екстремальних температур, необхідних для підтримки процесу				вдихання токсичних парів; зневоднення
4	Шуму	Втрата рівноваги, дезорієнтація в робочій зоні роботоклітини				вплив на слух і рівновагу, свідомість;
		Нездатність двох осіб, яким призначено завдання, координувати свої дії шляхом звичайної розмови				вплив на мовлення спілкування, сприйняття акустичних сигналів;
		Рівень навколишнього шуму настільки високий або відволікаючий, що не дозволяє почути або зрозуміти звукові сигнали попередження про небезпеку				втрата слуху
		Тривалий вплив підвищеного рівня шуму				
5	Віб-рації	Ослаблення з'єднань, кріпильних деталей, компонентів, що призводить до несподіваної зупинки або висування частин				втома;
						неврологічні пошкодження;
						судинний розлад
6	*	ЕМП перешкоджає правильній роботі системи				опіки;
		Під впливом технологічного випромінювання, наприклад дугового зварювання, лазера				захворювання

* – Випромінювання

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
7	Ергономічні	Погано спроектовані навчальні панелі або сенсорні екрани (НМІ), розташовані високо або далеко.				втома;
		Погано спроектовані місця завантаження/розвантаження: велика відстань між розташуванням компонентів і зоною завантаження/розвантаження.				удари;
		Погано спроектовані пристрої активації.				падіння;
		Невідповідне розташування елементів керування.				втрати пильності;
		Випадкова активація елементів керування.				стрес;
		Труднощі доступу через додаткові ризики, пов'язані з невідповідним розташуванням елементів керування.				наслідки людських помилок
		Труднощі доступу до компонентів для обслуговування (усунення неполадок, ремонт, налаштування) через їх неправильне розташування.				
		Погане освітлення робочих зон, що ускладнює розпізнавання ризиків і небезпечних ситуацій.				
		Компоненти в закритих зонах, які блокують існуюче освітлення.				
		Блоки НМІ розташовані занадто високо або занадто низько для зручного перегляду.				
8	Матеріалу/речовини	Обслуговування, змащення та заміна компонентів, які перебувають у контакті з рідинами (охолоджувальними чи технологічними)				отруєння;
		Несподівані відмови механічних та електричних компонентів роботизованої системи та систем захисту.				вдихання корозійних парів та пилю;
						опіки.
9	Середовище	Проектування, причинене навколишнім середовищем, тобто встановлення в зонах землетрусів.				форс-мажор;
		Неправильне визначення справжньої проблеми та складної проблеми шляхом виконання неправильних або непотрібних дій.				індуковані збої;
		Одна дія або помилка збільшує серйозність шкоди, тобто намагаючись уникнути гострого краю, замість цього відбувається контакт з гарячою поверхнею.				небезпечна рефлекторна дія
10	Комбіновані	Несподівані рухи робота або кінцевих ефекторів або пов'язаних машини.				відновлення енергопостачання після перерви;
		Непередбачувана поведінка елементів керування машиною через електромагнітні перешкоди або стрибки в джерелі енергії.				
		Одна особа керує роботосистемою, але ця дія не очікується іншою особою.				зовнішній вплив на джерело живлення

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
		Неправильне сприйняття роботів, які співпрацюють, або одночасний рух.				
		Видана команда зупинки зупиняє робота в неповному циклі.				
		Швидкість роботизованої системи можна регулювати, завдяки чому різні завдання виконуються з різною швидкістю.				
		Несправності керування, що спричиняють звільнення утримуваних пристроїв на столі завантаження або змушують виконавчі механізми рухатися під дією залишкових сил (інерція, гравітація, пружина/накопичувач енергії), що може призвести до утворення «снаряду».				
		Несправності керування, що спричиняють звільнення гальма роботизованої руки; звільнення гальма змушує елементи робота рухатися під дією залишкових сил (інерції, гравітації, пружина/засобів накопичення енергії) несподівано.				
		Несподівані рухи робота, виконавчих механізмів, додаткових осей або пов'язаного обладнання.				
		Несподівані рухи робота, кінцевий ефекторів, допоміжної осі або пов'язаного обладнання.				
		Нездатність захисного пристрою функціонувати належним чином.				
		Ослаблені, незакріплені шланги та компоненти від'єднуються або розбиваються.				
		Компоненти неправильно встановлені, що створює несподіваний рух/небезпеку.				
		Високошвидкісні обертові частини, що ламаються або від'єднуються від обладнання для утримання деталей.				
		Перевантаження руки робота або пов'язаного обладнання, що призводить до поломки або викривлення механічних компонентів.				
		Потрапляння в контакт через витіснення, пов'язане з процесом (тобто точкове зварювання).				
		Вихід з ладу пристрою утримання деталей.				
		Нестримний робот або пов'язана з ним частина машини (утримується в положенні тяжіння) подає або перевертається.				
		Усунення несправностей під час введення в експлуатацію або виведення з експлуатації.				
		Деталі можуть впасти, якщо неправильно прикріпити або встановити неправильно.				
		Недостатнє освітлення в зоні оператора або камері робота.				
		Перешкоди на підлозі камери.				
		Розсувна підлога.				
		Невдале розташування комунікацій.				
		Специфічні небезпеки застосування.				

6. Апробування розробленої методики оцінки ризиків

Для апробації розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами на робочому місці: контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A (рис. 2 – рис. 4). Результати оцінки деяких професійних ризиків даних працівників наведені в табл. 4.



а)



б)

Рис. 2. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis: а – до вимірювання; б – під час вимірювання



а)



б)

Рис. 3. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05: а – під час вимірювання; б – під час налаштування

Табл. 4. Результати оцінки деяких професійних ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами

№ з/п	Походження небезпеки	Рівень ризику	Заходи
Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis			
1	Переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі	22 (помірний)	Провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту.
2	Рух частин робота	34 (помірний)	Провести навчання щодо безпечної експлуатації, обмежити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту.
3	Компоненти неправильно встановлені, що створює несподіваний рух/небезпеку.	40 (помірний)	Перед початком експлуатації перевіряти працездатність встановлення деталі для вимірювання, обмежити швидкість руху під час вимірювання.
4	Специфічні небезпеки застосування.	42 (суттєвий)	Зменшити вагове навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару.
Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05			
5	Рухи (нормальні чи несподівані) будь якої частини робота (включаючи спину)	20 (помірний)	Тримати дистанцію під час проведення вимірювань. Не розміщувати руки в зоні переміщення рухомих частин.
6	Непередбачувана поведінка елементів керування машиною через електромагнітні перешкоди або стрибки в джерелі енергії.	33 (помірний)	Передбачити випрямовувачі току та напруги.
Робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A			
7	Рух частин робота	36 (помірний)	Обмежити доступ оператора в зоні дії робота, передбачити кінцеві вимикачі на вході в зону дії робота та запровадити біркову систему.
8	Контакт з струмоведучими частинами або з'єднаннями	51 (суттєвий)	Забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту. Перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин. Систематично проводити навчання з електробезпеки.
9	Гарячі поверхні, пов'язані з кінцевим ефектором; або пов'язане обладнання чи деталь	45 (суттєвий)	Забезпечити працівника термостійкими та іскростійкими рукавицями.
10	Під впливом технологічного випромінювання, наприклад дугового зварювання, лазера	40 (помірний)	Забезпечити працівника захисним шоломом чи маскою для зварювання.

Було розроблено заходи для зменшення чи усунення ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами, що є важливим кром для безпеки людей та робіт на підприємствах машинобудування. Використання розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами дає можливість визначити рівень ризику на відповідних робочих місцях та впровадити заходи для зниження їх рівня.

8. Обговорення результатів досліджень з підвищення рівня безпеки робіт та маніпуляторів

За результатами оцінки професійних ризиків, розробленою методикою під час роботи з роботами та маніпуляторами, деяких, найбільш значимих професійних ризиків контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis (рис. 2), було встановлено, що негативна дія переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі може призвести до рівня ризику 22, який є помірним, при цьому тяжкість шкоди, яка може призвести до конкретної небезпеки дорівнює 2, а можливість виникнення цієї шкоди 3. Тому з метою зменшення або усунення ризику та попередження виникнення можливих наслідків було запропоновано запровадити запобіжні та захисні заходи, провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту. Аналогічно при комбінованій небезпеці, специфічній небезпеці застосування, рівень ризику складає 42 має суттєве значення, тому необхідно негайно вжити заходи зі зменшення вагового навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару.



а)



б)

Рис. 4. Робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A: а – зварювальний робот; б – роботизований зварювальний комплекс

Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 є більш небезпечним ніж контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis (рис. 3). Бо координатно-вимірювальна машина може управлятися самим контролером, або працювати самостійно, що може призвести до непередбачувальних різких рухів, що може призвести до затискання кінцівок між рухомими та нерухомими частинами, удару контролера чи інших працівників які знаходяться в зоні дії машини, можливо потрапляння в очі сторонніх предметів, а також ураження електричним струмом. Дана робота характерна підвищеною напругою, під час концентрації уваги в процесі налаштування, калібрування та вимірювання, що може призвести до передчасної втоми контролера.

Найбільш небезпечним робочим місцем є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A (рис. 4), бо він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпека та небезпе-

кою випромінювання, найбільше значення має ризик при контакті оператора з струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий), який може призвести не тільки до опіків, але й зупинки серцебиття та дихання, смерті оператора, тому забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту, необхідно періодично перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин, систематично проводити навчання з електробезпеки, роботизований комплекс повинен бути заземленим.

Отримані результати пояснюються тим, що для робочих місць: контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05 та оператор зварювального робота ABB IRB 1400 M94A характерні специфічні шкідливі та небезпечні умови праці, що обумовлене конструктивними та технологічними особливостями роботів і маніпуляторів, які призводять до виникнення небезпечних ситуацій та професійних ризиків, але запровадження заходів з безпеки праці надає можливість зменшити їх рівні або усунути взагалі.

Забезпечення безпеки роботів та маніпуляторів направлено на оцінку ризиків за існуючими методиками, які є загальними та неадаптованими до особливостей різних типів роботів, не враховують вимоги міжнародних стандартів. Тому розроблена методика оцінки ризиків при роботі з роботами та маніпуляторами надає можливість врахувати важкість шкоди до якої може призвести конкретна небезпека та можливість виникнення цієї шкоди, масштаб поширювання шкоди на кілька осіб, нараження осіб на небезпеку, надійність обладнання, хронічку шкоди для здоров'я та нещасних випадків, порівняння ризиків, можливість усунення чи обмеження шкоди, швидкість настання шкоди та людський чинник. Крім того дана методика надає можливість оцінити ризики, які спричинені не тільки механічними, електричними, термічними небезпеками, утворюваним шумом, спричиненими вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційними, ергономічними небезпеками, які пов'язані з середовищем у якому використовується роботи і маніпулятори, а також комбінацією небезпек, а також враховує не тільки ризики на певному робочому місці, але для самих роботів та маніпуляторів, а також небезпеки, які виникають при взаємодії з іншими пристроями та системами, то б то небезпеки до оточуючого середовища роботів та маніпуляторів, крім людини. Дана методика має анкету визначення типу або групи небезпек під час роботи з роботами та маніпуляторами, походження небезпек та їх потенційні наслідки (табл. 3), матрицю визначення рівня професійного ризику під час роботи з роботами та маніпуляторами (табл. 4) та чек-лист для визначення величини професійного ризику (табл. 1), які дозволяють спростити процедуру оцінки та отримати більш точний результат.

До обмежень, які притаманні цим дослідженням можливо віднести те, що випробування розробленої методики оцінки ризиків проводили тільки на одному машинобудівному підприємстві, але було обрано три робочих місця, які мають різну специфіку роботи, небезпеки та професійні ризики.

До недоліків даного дослідження можливо відзначити те, що не враховує вимог стандарту ДСТУ EN ISO 13482:2019 Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності роботів особистого догляду (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT) [50]. Тому у зв'язку тим, що в побуті для вирішення соціальних проблем використовують роботи та роботизовані пристрої, для забезпечення без-

пеки роботів особистого догляду необхідно врахувати вимоги даного стандарту та удосконалити дану методику, що стане розвитком даного дослідження.

9. Висновки

1. Було розроблено методику оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами, яка дозволяє враховувати такі аспекти, як ступінь важкості потенційної шкоди, ймовірність її виникнення, масштаб поширення шкоди на кількох осіб, рівень нараження людей на небезпеку, надійність обладнання, хронічний вплив на здоров'я та нещасні випадки. Також методика враховує можливість усунення або обмеження шкоди, швидкість її настання та вплив людського фактора.

Крім цього, методика оцінює ризики, пов'язані не лише з механічними, електричними, термічними небезпеками, шумом, вібрацією, випромінюванням, матеріалами, речовинами, радіаційними та ергономічними факторами, а й з умовами середовища, у якому використовуються роботи й маніпулятори. Вона враховує комбіновані небезпеки, а також ризики не лише на конкретному робочому місці, але й для самих роботів та маніпуляторів. Крім того, методика аналізує загрози, що виникають під час взаємодії з іншими пристроями та системами, а також потенційні небезпеки для навколишнього середовища роботів та маніпуляторів, окрім ризиків для людини.

2. Апробація (випробування) розробленої методики під час оцінки деяких, значущих ризиків, контролера відділу технічного контролю, який працює з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis, контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05, оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A та розробка заходів з їх зменшення або усунення показали, що на машинобудівному підприємстві помірні та суттєві рівні професійних ризиків від 20 до 51. За результатами оцінки під час роботи з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis встановлено, що негативна дія переміщення (нормальні чи несподівані) зовнішньої осі може призвести до рівня ризику 22, який є помірним. Тяжкість шкоди дорівнює 2, можливість виникнення – 3. Для зменшення або усунення ризику запропоновано запровадити запобіжні та захисні заходи, провести навчання щодо безпечної експлуатації, знаків безпеки, зменшити навантаження на працівника, забезпечити засобами індивідуального захисту. При комбінованій небезпеці, специфічній небезпеці застосування, рівень ризику складає 42, що має суттєве значення. Тому необхідно негайно вжити заходи зі зменшення вагового навантаження на руку контролера, обмежити доступ до місць затискання та удару. Робоче місце контролера відділу технічного контролю, який працює з координатно-вимірювальною машиною GLOBAL S GREEN 05.07.05, є більш небезпечним, ніж у випадку з вимірювальною рукою Absolute Arm 7-Axis. Координатно-вимірювальна машина може управлятися самим контролером або працювати самостійно, що може призвести до непередбачуваних різких рухів, затискання кінцівок між рухомими та нерухомими частинами, удару контролера чи інших працівників, які знаходяться в зоні дії машини, потрапляння в очі сторонніх предметів та ураження електричним струмом. Дана робота характерна підвищеною напругою, під час концентрації уваги в процесі налаштування, калібрування та вимірювання, що може призвести до передчасної втоми контролера. Найбільш небезпечним є робоче місце оператора зварювального робота ABB IRB 1400 M94A, оскільки він зіштовхується з механічними, термічними, електричними, ергономічними, комбінованими небезпеками та небезпекою випромінювання. Найбільше значення має ризик при контакті

оператора зі струмоведучими частинами або з'єднаннями, що складає 51 (суттєвий), який може призвести не тільки до опіків, але й зупинки серцебиття та дихання, смерті оператора. Тому необхідно забезпечити працівника діелектричними засобами індивідуального захисту, періодично перевіряти стан джерел струму та ізолюючих частин, систематично проводити навчання з електробезпеки, роботизований комплекс повинен бути заземленим.

Отже, розробка заходів для зменшення та усунення ризиків є важливою задачею для забезпечення безпеки праці під час роботи з роботами та маніпуляторами. Використання розробленої методики оцінки ризиків під час роботи з роботами та маніпуляторами може допомогти визначити рівень ризику на робочому місці та вжити необхідні заходи для зниження ризику до прийнятного рівня або його усунення.

Література

1. Industrial robots, workers' safety, and health / R. Gihleb et al. Labour economics. 2022. Vol. 78. P. 102205. doi: 10.1016/j.labeco.2022.102205
2. Caiazza C., Nestić S., Savković M. A systematic classification of key performance indicators in human-robot collaboration. Sustainable business management and digital transformation: challenges and opportunities in the post-covid era. Cham. 2022. P. 479–489. doi: 10.1007/978-3-031-18645-5_30
3. Yetkin B. N., Ulutas B. H. A Literature Review on Human-robot Collaborative Environments Considering Ergonomics. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering. Cham. 2022. P. 49–60. doi: 10.1007/978-3-031-08782-0_5
4. Operations management issues in design and control of hybrid human-robot collaborative manufacturing systems: a survey / S. E. Hashemi-Petroodi et al. Annual reviews in control. 2020. Vol. 49. P. 264–276. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.04.009
5. Gualtieri L., Rauch E., Vidoni R. Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: a systematic literature review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021. Vol. 67. P. 101998. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998
6. Olsen T. L., Tomlin B. Industry 4.0: opportunities and challenges for operations management. Manufacturing & service operations management. 2020. Vol. 22. № 1. P. 113–122. doi: 10.1287/msom.2019.0796
7. Physical ergonomic improvement and safe design of an assembly workstation through collaborative robotics / A. Colim et al. Safety. 2021. Vol. 7. № 1. P. 14. doi: 10.3390/safety7010014
8. Safety, ergonomics and efficiency in human-robot collaborative assembly: design guidelines and requirements / L. Gualtieri et al. Procedia CIRP. 2020. Vol. 91. P. 367–372. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.188
9. A human-robot collaboration framework for improving ergonomics during dexterous operation of power tools / W. Kim et al. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2021. Vol. 68. P. 102084. doi: 10.1016/j.rcim.2020.102084
10. Chutima P. Research trends and outlooks in assembly line balancing problems. Engineering journal. 2020. Vol. 24. № 5. P. 93–134. doi: 10.4186/ej.2020.24.5.93
11. Balancing of assembly lines with collaborative robots / C. Weckenborg et al. Business research. 2019. Vol. 13. № 1. P. 93–132. doi: 10.1007/s40685-019-0101-y
12. Ergonomics and safety in the design of industrial collaborative robotics / S. Pinheiro et al. Studies in systems, decision and control. Cham. 2021. P. 465–478. doi: 10.1007/978-3-030-89617-1_42

13. Srivatsan H., Myagerimath A. V., Duffy V. G. A systematic review of collaborative robots in ergonomics. *Digital human modeling and applications in health, safety, ergonomics and risk management*. Cham. 2024. P. 282–297. doi: 10.1007/978-3-031-61066-0_17
14. Ergonomic human-robot collaboration in industry: a review / M. Lorenzini et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2023. Vol. 9. doi: 10.3389/frobt.2022.813907
15. Handbook of human factors and ergonomics / ed. by G. Salvendy, W. Karwowski. Wiley. 2021. doi: 10.1002/9781119636113
16. Teaming with industrial cobots: a socio-technical perspective on safety analysis / A. Adriaensen et al. *Human factors and ergonomics in manufacturing & service industries*. 2021. Vol. 32. № 2. P. 173–198. doi: 10.1002/hfm.20939
17. Redefining safety in light of human-robot interaction: a critical review of current standards and regulations / A. Martinetti et al. *Frontiers in chemical engineering*. 2021. Vol. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237
18. Human robot collaboration in industrial environments / G. Michalos et al. *The 21st century industrial robot: when tools become collaborators*. Cham. 2021. P. 17–39. doi: 10.1007/978-3-030-78513-0_2
19. Seamless human–robot collaboration in industrial applications / S. Makris et al. *Lecture notes in mechanical engineering*. Cham. 2024. P. 39–73. doi: 10.1007/978-3-031-54034-9_2
20. Human-Centered approach for the design of a collaborative robotics workstation / A. Colim et al. *Occupational and environmental safety and health II*. Cham. 2020. P. 379–387. doi: 10.1007/978-3-030-41486-3_41
21. Kopp T., Baumgartner M., Kinkel S. Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: an empirically driven framework. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2020. doi: 10.1007/s00170-020-06398-0
22. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda / A. Keshvarparast et al. *Journal of intelligent manufacturing*. 2024. Vol. 35. P. 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w
23. Multimodal perception-fusion-control and human–robot collaboration in manufacturing: a review / J. Duan et al. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2024. doi: 10.1007/s00170-024-13385-2
24. Redefining safety in light of human-robot interaction: a critical review of current standards and regulations / A. Martinetti et al. *Frontiers in chemical engineering*. 2021. Vol. 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237 (date of access: 29.12.2024)
25. Keeping workers safe in the automation revolution. Brookings. URL: <https://www.brookings.edu/articles/keeping-workers-safe-in-the-automation-revolution/>
26. Liang C.-J., Cheng M. H. Trends in robotics research in occupational safety and health: a scientometric doi: analysis and review. *International journal of environmental research and public health*. 2023. Vol. 20. № 10. P. 5904. doi: 10.3390/ijerph20105904
27. Editorial: safety in close human-robot interaction / M. Valori et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2023. Vol. 10. doi: 10.3389/frobt.2023.1288713.
28. Human–Robot collaboration trends and safety aspects: a systematic review / J. Arents et al. *Journal of sensor and actuator networks*. 2021. Vol. 10. № 3. P. 48. doi: 10.3390/jsan10030048
29. A taxonomy of factors influencing perceived safety in human–robot interaction / N. Akalin et al. *International journal of social robotics*. 2023. doi: 10.1007/s12369-023-01027-8

30. Examining profiles for robotic risk assessment / T. Bridgwater et al. HRI '20: ACM/IEEE international conference on human-robot interaction, Cambridge United Kingdom. New York, NY, USA, 2020. doi: 10.1145/3319502.3374804
31. Vecellio Segate R., Daly A. Encoding the enforcement of safety standards into smart robots to harness their computing sophistication and collaborative potential: a legal risk assessment for european union policymakers. *European journal of risk regulation*. 2023. P. 1–40. doi: 10.1017/err.2023.72
32. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda / A. Keshvarparast et al. *Journal of intelligent manufacturing*. 2024. Vol. 35. P. 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w
33. Risk assessment tools for industrial human-robot collaboration: novel approaches and practical needs / T. P. Huck et al. *Safety science*. 2021. Vol. 141. P. 105288. doi: 10.1016/j.ssci.2021.105288
34. BS EN ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010). Effective from 2010-10-09. Official edition. Brussels : BSI, 2011. 77 p. URL: <https://nobelcert.com/DataFiles/FreeUpload/BS%20EN%20ISO%2012100-2010.pdf>
35. Lee K., Shin J., Lim J.-Y. Critical hazard factors in the risk assessments of industrial robots: causal analysis and case studies. *Safety and health at work*. 2021. doi: 10.1016/j.shaw.2021.07.010
36. A SafeML extension for a unified risk assessment to diverse service robots / T. Miyoshi et al. *ROBOMECH journal*. 2023. Vol. 10. № 1. doi: 10.1186/s40648-023-00245-z
37. Novel approach using risk analysis component to continuously update collaborative robotics applications in the smart, connected factory model / M. Pantano et al. *Applied sciences*. 2022. Vol. 12. № 11. P. 5639. doi: 10.3390/app12115639
38. Safe human-robot collaboration: a systematic review of risk assessment methods with AI integration and standardization considerations / M. J. Alenjareghi et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. doi: 10.1007/s00170-024-13948-3
39. Safety assessment of human-robot collaborations using failure mode and effects analysis and bow-tie analysis / A. Haggy et al. 21st international conference on informatics in control, automation and robotics, Porto, Portugal, 18–20 November 2024. 2024. P. 432–439. doi: 10.5220/0013017500003822
40. Hazard identification and risk assessment of intelligent robots based on virtual reality / X. Liu et al. *Frontiers in artificial intelligence and applications*. 2023. doi: 10.3233/faia230801
41. Towards safe human robot collaboration – Risk assessment of intelligent automation / A. Hanna et al. 2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA), Vienna, Austria, 8–11 September 2020. 2020. doi: 10.1109/etfa46521.2020.9212127
42. Safety assessment review of a dressing assistance robot / D. Delgado Bellamy et al. *Frontiers in robotics and AI*. 2021. Vol. 8. doi: 10.3389/frobt.2021.667316
43. Internal state-based risk assessment for robots in hazardous environment / J. David et al. *Towards autonomous robotic systems*. Cham. 2022. P. 137–152. doi: 10.1007/978-3-031-15908-4_12
44. Yavorska O., Khudolii S., Cheberiyachko Y., Mamaikin O., Khorolskyi A. Assessment of the risk of a dangerous event of a human collision with a remote-controlled robot. *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 567. P. 01018. doi: 10.1051/e3sconf/202456701018

45. Aichaoui N. E. Y., Kovács T. A. Risk assessment of industrial collaborative welding robots: a critical review of methodologies and limitations. *Advanced sciences and technologies for security applications*. Cham. 2024. P. 149–159. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_14
46. Robots and human interaction in a furniture manufacturing industry – risk assessment / A. Colim et al. *Advances in intelligent systems and computing*. Cham. 2020. P. 81–90. doi: 10.1007/978-3-030-20497-6_8
47. ДСТУ EN ISO 10218-1:2018. Роботи та роботизовані пристрої. вимоги щодо безпечності промислових роботів. частина 1. роботи (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 10218-1:2014 ; чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81561
48. ДСТУ EN ISO 10218-2:2018. Роботи та роботизовані пристрої. вимоги щодо безпечності промислових роботів. частина 2. роботизовані системи та їхні поєднання (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 10218-2:2014 ; чинний від 2020-01-01. Вид. офіц. 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81746
49. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT). На заміну ДСТУ EN 292-1-2001, ДСТУ EN 292-2-2001, ДСТУ EN 1050:2003, ДСТУ EN ISO 12100:2014 ; чинний від 2018-07-01. Вид. офіц. 2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627
50. ДСТУ EN ISO 13482:2019. Роботи та роботизовані пристрої. Вимоги щодо безпечності роботів особистого догляду (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT). На заміну ДСТУ EN ISO 13482:2014 ; чинний від 2021-01-01. Вид. офіц. 2019. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88307

B. Tsymbal¹, DSc, Associate Professor, Professor of the Department

E. Rybka¹, DSc, Professor, Professor of the Department

P. Svirzhevskiy¹, Student

O. Rybalova¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

A. Petryshchev², PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Zaporozhye, Ukraine

IMPROVING THE SAFETY LEVEL OF ROBOTS AND MANIPULATORS

The research focuses on developing a methodology to improve the safety of robots and manipulators in industrial environments. Robotic systems effectively perform complex and dangerous tasks, but at the same time create new risks for workers, which requires systematic assessment and management. An analysis of the main factors affecting the safety of robotic systems was conducted, in particular mechanical, ergonomic, thermal and electrical hazards. Based on this, a universal methodology for assessing occupational risks was developed, which takes into account the severity of possible injuries, the probability of their occurrence, personnel qualifications, the speed of danger onset and the level of awareness of workers. The methodology includes developed checklists, risk assessment matrices and questionnaires for identifying hazardous factors and determining the level of risks. To verify its effectiveness, a test was conducted at a machine-building enterprise, where the risks for employees working with the Absolute Arm 7-Axis measuring arm, the GLOBAL S GREEN 05.07.05 coordinate measuring machine and the ABB IRB 1400 M94A welding robot were assessed. It was found that the most dangerous workplace is the workplace of the ABB IRB 1400 M94A welding robot operator, because he is faced with mechanical, thermal, electrical, ergonomic, combined hazards and radiation hazards, the most important is the risk when the operator contacts live parts or connections, which is 51 (significant). The results showed the key risks at the workplaces, as well as the effectiveness

of the developed measures to minimize them. Personnel training, restriction of access to hazardous areas and the use of personal protective equipment were introduced. The methodology can be applied to identify risks and implement safety measures at enterprises in various industries.

Keywords: occupational risks, occupational safety, cobots, robots, manipulators, artificial intelligence

References

1. Gihleb, R., Giuntella, O., Stella, L., Wang, T. (2022). Industrial robots, workers' safety, and health. *Labour Economics*, 78, 102205. doi: 10.1016/j.labeco.2022.102205
2. Caiazzo, C., Nestić, S., Savković, M. (2022). A systematic classification of key performance indicators in human-robot collaboration. In *Sustainable business management and digital transformation: Challenges and opportunities in the post-covid era*, 479–489. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-18645-5_30
3. Yetkin, B. N., Ulutas, B. H. (2022). A Literature Review on Human-robot Collaborative Environments Considering Ergonomics. In *Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*, 49–60. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-08782-0_5
4. Hashemi-Petroodi, S. E., Thevenin, S., Kovalev, S., Dolgui, A. (2020). Operations management issues in design and control of hybrid human-robot collaborative manufacturing systems: A survey. *Annual Reviews in Control*, 49, 264–276. doi: 10.1016/j.arcontrol.2020.04.009
5. Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R. (2021). Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 101998. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998
6. Olsen, T. L., Tomlin, B. (2020). Industry 4.0: Opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113–122. doi: 10.1287/msom.2019.0796
7. Colim, A., Faria, C., Cunha, J., Oliveira, J., Sousa, N., Rocha, L. A. (2021). Physical ergonomic improvement and safe design of an assembly workstation through collaborative robotics. *Safety*, 7(1), 14. doi: 10.3390/safety7010014
8. Gualtieri, L., Rauch, E., Vidoni, R., Matt, D. T. (2020). Safety, ergonomics and efficiency in human-robot collaborative assembly: Design guidelines and requirements. *Procedia CIRP*, 91, 367–372. doi: 10.1016/j.procir.2020.02.188
9. Kim, W., Peternel, L., Lorenzini, M., Babič, J., Ajoudani, A. (2021). A human-robot collaboration framework for improving ergonomics during dexterous operation of power tools. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68, 102084. doi: 10.1016/j.rcim.2020.102084
10. Chutima, P. (2020). Research trends and outlooks in assembly line balancing problems. *Engineering Journal*, 24(5), 93–134. doi: 10.4186/ej.2020.24.5.93
11. Weckenborg, C., Kieckhäfer, K., Müller, C., Grunewald, M., Spengler, T. S. (2019). Balancing of assembly lines with collaborative robots. *Business Research*, 13(1), 93–132. doi: 10.1007/s40685-019-0101-y
12. Pinheiro, S., Correia Simões, A., Pinto, A., Van Acker, B. B., Bombeke, K., Romero, D., Vaz, M., Santos, J. (2021). Ergonomics and safety in the design of industrial collaborative robotics. In *Studies in systems, decision and control*. Springer International Publishing, 465–478. doi: 10.1007/978-3-030-89617-1_42
13. Srivatsan, H., Myagerimath, A. V., Duffy, V. G. (2024). A systematic review of collaborative robots in ergonomics. In *Digital human modeling and applications in*

health, safety, ergonomics and risk management, 282–297. Springer Nature Switzerland. doi: 10.1007/978-3-031-61066-0_17

14. Lorenzini, M., Lagomarsino, M., Fortini, L., Gholami, S., Ajoudani, A. (2023). Ergonomic human-robot collaboration in industry: A review. *Frontiers in Robotics and AI*, 9. doi: 10.3389/frobt.2022.813907

15. Salvendy, G., Karwowski, W. (2021). *Handbook of human factors and ergonomics*. Wiley. doi: 10.1002/9781119636113

16. Adriaensen, A., Costantino, F., Di Gravio, G., Patriarca, R. (2021). Teaming with industrial cobots: A socio-technical perspective on safety analysis. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 32(2), 173–198. doi: 10.1002/hfm.20939

17. Martinetti, A., Chemweno, P. K., Nizamis, K., Fosch-Villaronga, E. (2021). Redefining safety in light of human-robot interaction: A critical review of current standards and regulations. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237

18. Michalos, G., Karagiannis, P., Dimitropoulos, N., Andronas, D., Makris, S. (2021). Human robot collaboration in industrial environments. In *The 21st century industrial robot: When tools become collaborators*, 17–39. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-78513-0_2

19. Makris, S., Michalos, G., Dimitropoulos, N., Krueger, J., Haninger, K. (2024). Seamless human–robot collaboration in industrial applications. In *Lecture notes in mechanical engineering*, 39–73. Springer Nature Switzerland. doi: 10.1007/978-3-031-54034-9_2

20. Colim, A., Carneiro, P., Costa, N., Faria, C., Rocha, L., Sousa, N., Silva, M., Braga, A. C., Bicho, E., Monteiro, S., Arezes, P. M. (2020). Human-Centered approach for the design of a collaborative robotics workstation. In *Occupational and environmental safety and health II*, 379–387. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-030-41486-3_41

21. Kopp, T., Baumgartner, M., Kinkel, S. (2020). Success factors for introducing industrial human-robot interaction in practice: An empirically driven framework. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-020-06398-0

22. Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., Pirayesh, A. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: Literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 2065–2118. doi: 10.1007/s10845-023-02137-w

23. Duan, J., Zhuang, L., Zhang, Q., Zhou, Y., Qin, J. (2024). Multimodal perception-fusion-control and human–robot collaboration in manufacturing: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-024-13385-2

24. Martinetti, A., Chemweno, P. K., Nizamis, K., Fosch-Villaronga, E. (2021). Redefining safety in light of human-robot interaction: A critical review of current standards and regulations. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3. doi: 10.3389/fceng.2021.666237

25. Keeping workers safe in the automation revolution. (n.d.). Brookings. Available at: <https://www.brookings.edu/articles/keeping-workers-safe-in-the-automation-revolution/>

26. Liang, C.-J., Cheng, M. H. (2023). Trends in robotics research in occupational safety and health: A scientometric analysis and review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(10), 5904. doi: 10.3390/ijerph20105904

27. Valori, M., Prange-Lasonder, G., Saenz, J., Behrens, R., Bidard, C., Lucet, E.,

Fassi, I. (2023). Editorial: Safety in close human-robot interaction. *Frontiers in Robotics and AI*, 10. doi: 10.3389/frobt.2023.1288713

28. Arents, J., Abolins, V., Judvaitis, J., Vismanis, O., Oraby, A., Ozols, K. (2021). Human–Robot collaboration trends and safety aspects: A systematic review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 10(3), 48. doi: 10.3390/jsan10030048

29. Akalin, N., Kiselev, A., Kristoffersson, A., Loutfi, A. (2023). A taxonomy of factors influencing perceived safety in human–robot interaction. *International Journal of Social Robotics*. doi: 10.1007/s12369-023-01027-8

30. Bridgwater, T., Giuliani, M., van Maris, A., Baker, G., Winfield, A., Pipe, T. (2020). Examining profiles for robotic risk assessment. In *HRI '20: ACM/IEEE international conference on human-robot interaction*. ACM. doi: 10.1145/3319502.3374804

31. Vecellio Segate, R., Daly, A. (2023). Encoding the enforcement of safety standards into smart robots to harness their computing sophistication and collaborative potential: A legal risk assessment for european union policymakers. *European Journal of Risk Regulation*, 1–40. doi: 10.1017/err.2023.72

32. Kaonain, T. E., Rahman, M. A. A., Ariff, M. H. M., Yahya, W. J., Mondal, K. (2021). Collaborative robot safety for human-robot interaction in domestic simulated environments. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012029. doi: 10.1088/1757-899x/1096/1/012029

33. Huck, T. P., Münch, N., Hornung, L., Ledermann, C., Wurll, C. (2021). Risk assessment tools for industrial human-robot collaboration: Novel approaches and practical needs. *Safety Science*, 141, 105288. doi: 10.1016/j.ssci.2021.105288

34. BS EN ISO 12100:2010. Safety of machinery – General principles for design – Risk assessment and risk reduction (ISO 12100:2010). Effective from 2010-10-09. Official edition. Brussels : BSI, 77. URL: <https://nobelcert.com/DataFiles/FreeUpload/BS%20EN%20ISO%2012100-2010.pdf>

35. Lee, K., Shin, J., Lim, J.-Y. (2021). Critical hazard factors in the risk assessments of industrial robots: Causal analysis and case studies. *Safety and Health at Work*. doi: 10.1016/j.shaw.2021.07.010

36. Miyoshi, T., Nakabo, Y., Fukui, H., Yashiro, M., Miyazawa, I., Sakamoto, T., Ando, N., Kuga, T., Kitamura, A., Ohara, K., Kimura, T. (2023). A SafeML extension for a unified risk assessment to diverse service robots. *ROBOMECH Journal*, 10(1). doi: 10.1186/s40648-023-00245-z

37. Pantano, M., Pavlovskiy, Y., Schulenburg, E., Traganos, K., Ahmadi, S., Regulín, D., Lee, D., Saenz, J. (2022). Novel approach using risk analysis component to continuously update collaborative robotics applications in the smart, connected factory model. *Applied Sciences*, 12(11), 5639. doi: 10.3390/app12115639

38. Alenjareghi, M. J., Keivanpour, S., Chinniah, Y. A., Jocelyn, S., Oulmane, A. (2024). Safe human-robot collaboration: A systematic review of risk assessment methods with AI integration and standardization considerations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. doi: 10.1007/s00170-024-13948-3

39. Haggy, A., Philip, A., Jacob, S., Schneider, J., Anchukandan, M., Kranz, P., Daun, M. (2024). Safety assessment of human-robot collaborations using failure mode and effects analysis and bow-tie analysis. In *21st international conference on informatics in control, automation and robotics*. SCITEPRESS – Science and Technology Publications, 432–439. doi: 10.5220/0013017500003822

40. Liu, X., Luo, H., Chen, Q., Wang, K. (2023). Hazard identification and risk assessment of intelligent robots based on virtual reality. In *Frontiers in artificial*

intelligence and applications. IOS Press. doi: 10.3233/faia230801

41. Hanna, A., Bengtsson, K., Gotvall, P.-L., Ekstrom, M. (2020). Towards safe human robot collaboration – Risk assessment of intelligent automation. In 2020 25th IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA). IEEE. doi: 10.1109/etfa46521.2020.9212127

42. Delgado Bellamy, D., Chance, G., Caleb-Solly, P., Dogramadzi, S. (2021). Safety assessment review of a dressing assistance robot. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. doi: 10.3389/frobt.2021.667316

43. David, J., Bridgwater, T., West, A., Lennox, B., Giuliani, M. (2022). Internal state-based risk assessment for robots in hazardous environment. In *Towards autonomous robotic systems*, 137–152. Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-031-15908-4_12

44. Yavorska, O., Khudolii, S., Cheberiachko, Y., Mamaikin, O., Khorolskyi, A. (2024). Assessment of the risk of a dangerous event of a human collision with a remote-controlled robot. *E3S Web of Conferences*, 567, 01018. doi: 10.1051/e3sconf/202456701018

45. Aichaoui, N. E. Y., Kovács, T. A. (2024). Risk assessment of industrial collaborative welding robots: A critical review of methodologies and limitations. In *Advanced sciences and technologies for security applications/ Springer Nature Switzerland*, 149–159. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_14

46. Colim, A., Costa, S., Cardoso, A., Arezes, P., Silva, C. (2020). Robots and human interaction in a furniture manufacturing industry – risk assessment. In *Advances in intelligent systems and computing*, Springer International Publishing, 81–90. doi: 10.1007/978-3-030-20497-6_8

47. Roboty ta robotyzovani prystroyi. vymohy shchodo bezpechnosti promyslovykh robotiv. Chastyna 1. Roboty (EN ISO 10218-1:2011, IDT; ISO 10218-1:2011, IDT) (DSTU EN ISO 10218-1:2018). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81561

48. Roboty ta robotyzovani prystroyi. vymohy shchodo bezpechnosti promyslovykh robotiv. Chastyna 2. Robotyzovani systemy ta yikhni poyednannya (EN ISO 10218-2:2011, IDT; ISO 10218-2:2011, IDT) (DSTU EN ISO 10218-2:2018). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=81746

49. Bezpechnist' mashyn. zahal'ni pryntsypy proektuvannya. Otsynyuvannya ryzykiv ta zmenshennya ryzykiv (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT) (DSTU EN ISO 12100:2016). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71627

50. Roboty ta robotyzovani prystroyi. Vymohy shchodo bezpechnosti robotiv osobystoho dohlyadu (EN ISO 13482:2014, IDT; ISO 13482:2014, IDT) (DSTU EN ISO 13482:2019). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=88307

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 15.04.2025

УДК 519.6

О. Є. Басманов¹, д.т.н., професор, пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

Д. І. Карпова¹, викл. каф. (ORCID 0000-0002-1692-3630)

Є. В. Морщ², д.т.н., завідувач відділу експертизи (ORCID 0000-0003-0131-2332)

С. В. Гарбуз¹, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6345-6214)

В. С. Бенедюк¹, ст. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-5109-5295)

О. В. Зазимко¹, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-7496-0248)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Державний НДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ВІД РЕЗЕРВУАРІВ З НАФТОПРОДУКТАМИ, ЩО ГОРЯТЬ

Побудовано модель для визначення щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в вертикальному сталевому резервуарі з нафтопродуктом. Модель враховує деформацію полум'я під впливом вітру: нахил осі полум'я та розширення його основи в підвітряний бік. Запропонований підхід спирається на відомі емпіричні залежності довжини полум'я та кута його відхилення від вертикальної осі в залежності від швидкості вітру, питомої масової швидкості вигорання рідини та діаметра резервуара. Ці залежності використано для визначення довжини полум'я в довільній точці, що лежить на основі полум'я. Це дозволило побудувати рівняння випромінюючої поверхні полум'я в параметричному вигляді. Отримана поверхня має конусоподібну форму з еліптичною основою, витягнутої за межі резервуара з підвітряного боку. Відносне розширення основи полум'я за межі резервуара збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Розроблено алгоритм розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням від полум'я до довільної площадки, заданої просторовими координатами і нормальним вектором. В алгоритмі використано покриття основи полум'я регулярною сіткою з подальшим застосуванням методів чисельного диференціювання для визначення нормального вектору до випромінюючої поверхні полум'я і методів чисельного інтегрування для оцінки коефіцієнта взаємного опромінення між полум'ям і площадкою, що нагрівається під впливом пожежі. Показано, що розширення основи резервуара призводить до істотного збільшення щільності теплового потоку з підвітряного боку резервуара. Отримані результати можуть бути використані для визначення наслідків теплового впливу пожежі на сусідні резервуари з нафтопродуктами та інше технологічне обладнання, а також для визначення зон безпечного розташування техніки та особового складу, задіяних у локалізації і ліквідації пожежі.

Ключові слова: пожежа горючої рідини, випромінююча поверхня полум'я, тепловий потік випромінюванням

1. Вступ

Склади нафти і нафтопродуктів є основним місцем їх зберігання в процесі їх переробки і транспортування. З початком повномасштабної російської агресії ціклади стали однією з пріоритетних цілей при ударах по об'єктах критичної інфраструктури. В залежності від їх розташування для ударів застосовувалися артилерія, ракети, безпілотні літальні апарати. Наслідком таких атак майже завжди ставали пожежі або руйнування резервуарів. На відміну від пожеж, які трапляються в мирний час внаслідок відмови обладнання або помилки оператора, така пожежа може починатися з горіння відразу кількох резервуарів одночасно. Це означає збільшення щільності теплового потоку на сусідні технологічні об'єкти та особовий склад, задіяний у локалізації і ліквідації пожежі. При цьому існуючі рекомендації щодо гасіння пожеж в резервуарних парках [1] виходять з припущення про горіння в одному резервуарі, або в обвалуванні резервуара. Згідно з оцінкою [2] у випадку пожеж горючих рідин в резервуарах або розливах на випромінювання припадає близько 92 % теплового потоку. В зв'язку з цим виникає необхідність визначення теплового потоку від осередку горіння складної форми, яким, наприклад, є одночасне горіння в кількох резервуарах.

Вибухи та пожежі, викликані тепловим впливом, можуть мати серйозні наслідки для життєдіяльності населення, ускладнити роботу рятувальних служб і техніки, а також заважати проведенню заходів з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій [3]. Внаслідок атаки безпілотними літальними апаратами по нафтобазі пожежа охопила всі дев'ять наземних резервуарів. При цьому 3 резервуари по 900 м³ та 1 резервуар об'ємом 400 м³ були повністю зруйновані. Інші 5 пошкоджені уламками з подальшим витоком палива за межі обвалування. Витікання і потрапляння рідини, що горить в приватний сектор призвело до загибелі 7 осіб, ще 3 було травмовано [4].

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку до них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [5] розглянуто основні аспекти пожежної безпеки резервуарних парків для зберігання нафтопродуктів, зокрема, можливі загрози та методи зниження ризиків виникнення пожеж. Але в роботі не розглянуто специфічні ризики, які можуть виникнути у випадку воєнних дій. В [6] використовуються математичні моделі для оцінки потенційних ризиків та обґрунтування заходів безпеки, у статті розглядаються основні механізми аварій, такі як розливи, вибухи пароповітряних сумішей та можливість доміно-ефекту. Але вплив типу рідини в резервуарі, що горить, на довжину факела, температуру його випромінюючої поверхні і ступінь чорноти залишено поза увагою. В [7] розглянуто проблему поширення теплового випромінювання від осередків пожеж та його впливу на прилеглі конструкції та об'єкти, проаналізовано основні механізми передачі тепла, а також наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень щодо ступеня впливу теплового випромінювання на матеріали та будівельні конструкції. Недоліком є те, що робота зосереджена переважно на лабораторних дослідженнях, що ускладнює перенесення отриманих результатів на випадки реальних пожеж. В [8] досліджено різні види аварій, серед яких розгерметизація резервуарів, займання парів нафти, вибухи, витоки та пожежі. Але і тут поза увагою залишається визначення теплового потоку від пожежі в резервуарі з горючою рідиною. В [9] проаналізовано основні фактори займання, механізми розвитку пожеж та методи їхнього запобігання, у тому числі системи виявлення, гасіння та протипожежного захисту. Проте можливість каскадного розповсюдження пожежі внаслідок теплового впливу пожежі на сусідні резервуари не розглянуто. Основні причини витоків (корозія резервуарів, порушення технологічних процесів, аварії) та оцінка їх впливу на довкілля, зокрема на забруднення ґрунтів, водних ресурсів та повітря розглядається в [10]. Однак, і тут не приділено уваги методам запобігання каскадному розповсюдженню пожеж. В [11] розглянуто ключові фактори ризику виникнення аварій в резервуарних парках, але основна увага приділена лише оцінці ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій, тоді як тепловий вплив пожежі на сусідні резервуари залишено поза увагою.

В [12] аналізуються фактори підвищеного ризику, зокрема можливі атаки на об'єкти критичної інфраструктури, наслідки бойових дій, а також обмеженість ресурсів для ліквідації пожеж у таких умовах. Запропоновано заходи для мінімізації ризиків, включаючи підвищення стійкості конструкцій резервуарів, застосування спеціалізованих засобів пожежогасіння та організаційні аспекти реагування на надзвичайні ситуації. Але не приділено належної уваги тепловому впливу від

пожежі в резервуарі, що горить, на техніку і особовий склад, залучені до локалізації і ліквідації пожежі.

В [13] розглянуто експериментальні дослідження впливу висоти вільного простору над поверхнею рідини на характеристики полум'я при пожежах в резервуарах з горючими рідинами. Експерименти проводилися у лабораторних умовах на ємностях (10÷20) см, але відомо, що горіння в ємностях діаметром менше 1 м істотно відрізняється від горіння в резервуарах діаметром понад кілька метрів внаслідок турбулентного характеру процесу горіння. В [14] дослідження присвячене розробці універсальної математичної моделі форми полум'я та аналітичних моделей для розрахунку геометричного коефіцієнта випромінювання на поверхні, що піддається впливу пожежі. У роботі представлено новий підхід до визначення розподілу теплового випромінювання на основі геометричних параметрів полум'я, що дозволяє більш точно оцінити рівень теплового навантаження на оточуючі об'єкти. Увагу приділено загальним параметрам полум'я та теплового випромінювання, але не враховано особливостей горіння таких рідин, таких як нафтопродукти, що мають суттєво відмінні характеристики горіння. В [15] використано модель точкового джерела випромінювання, але недоліком такого підходу є неможливість врахування геометрії полум'я, особливо в умовах вітрового впливу на нього. В [16] аналітично розраховано коефіцієнт взаємного опромінення між елементарною площадкою та полум'ям у вигляді сфери або еліпсоїду. Але спостереження за горінням рідин у резервуарах свідчать, що форма факела близька до конічної або циліндричної.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення форми полум'я над резервуаром і щільності теплового потоку випромінюванням від нього.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі теплового потоку випромінюванням від резервуарів з нафтопродуктами, що горять, в умовах вітру.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити характеристики полум'я над резервуаром в умовах вітрового впливу;
- побудувати рівняння випромінюючої поверхні полум'я у параметричній формі;
- розробити алгоритм визначення щільності теплового потоку випромінюванням.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини у вертикальному сталевому резервуарі (РВС), предметом – щільність теплового потоку від пожежі. Гіпотезою дослідження є можливість представлення випромінюючої поверхні полум'я певною геометричною фігурою. Припускається, що резервуар повністю заповнений нафтопродуктом. Для знаходження щільності теплового потоку випромінюванням використано закон Стефана–Больцмана. Для побудови випромінюючої поверхні полум'я і визначення нормального вектора до неї застосовано методи математичного аналізу і чисельного диференціювання. Розрахунок коефіцієнта взаємного опромінення проведено із використанням методів чисельного інтегрування у припущенні про відсутність додаткових перешкод між полум'ям і поверхнею, що

нагрівається. Програмну реалізацію алгоритму розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням виконано в середовищі програмування Delphi 12.

5. Моделювання теплового потоку випромінюванням від резервуарів з нафтопродуктами, що горять

5.1. Визначення характеристик полум'я над резервуаром в умовах вітрового впливу

Спостереження за полум'ям над горючою рідиною в умовах вітрового впливу свідчать про

- нахил факелу в напрямку вітру;
- розширення основи полум'я з підвітряного боку (рис. 1).

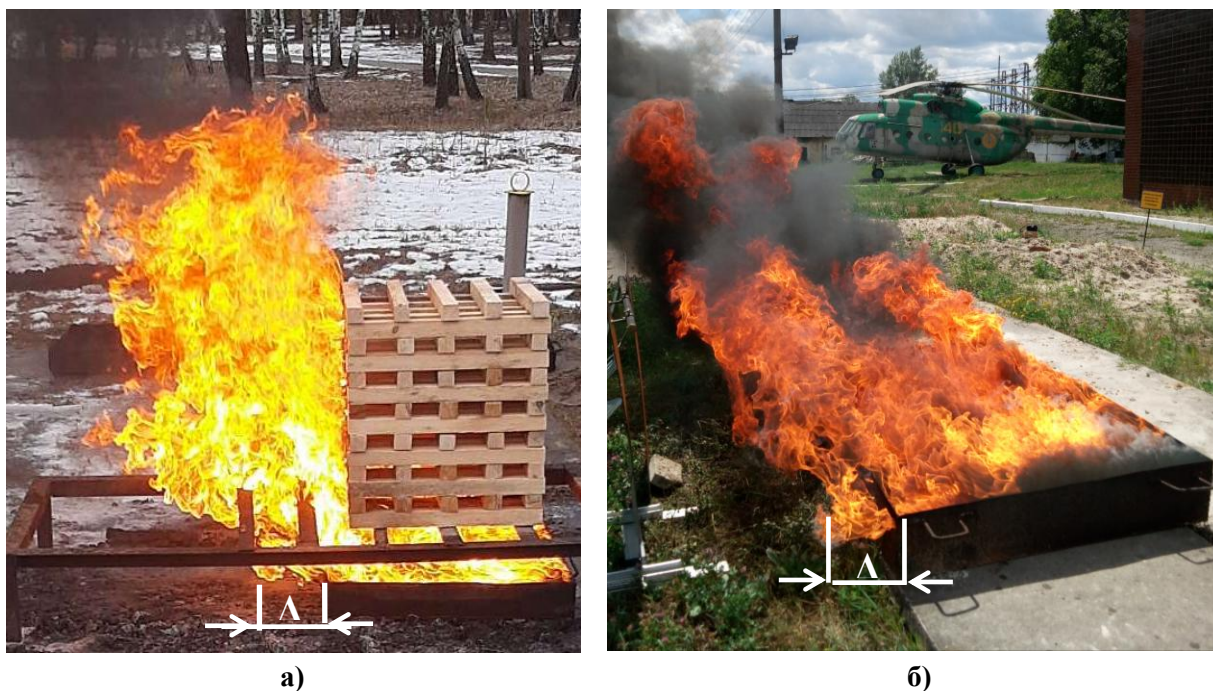


Рис. 1. Розширення основи полум'я на величину Δ з підвітряного боку: а – горіння бензину; б – горіння відпрацьованого мастила

У випадку горіння рідини у вертикальному сталевому резервуарі або круговому розливі розширення основи полум'я з підвітряного боку призводить до того, що основа полум'я приймає форму еліпса (рис. 3а), менша вісь якого дорівнює діаметру резервуара D , а більша [17]

$$D' = D + \Delta = 2,506D \cdot Fr^{0,067} Re^{-0,03} \left(\frac{\rho_v}{\rho_a} \right)^{0,145},$$

де Fr , Re – число Фруда і Рейнольдса відповідно:

$$Fr = \frac{w^2}{gD};$$

$$Re = \frac{wD}{\nu_a};$$

w – швидкість вітру; g – прискорення сили тяжіння; v_a – кінематична в'язкість повітря; ρ_a – густина повітря; ρ_v – густина парів горючої рідини при температурі кипіння.

На рис. 2 показано відносне розширення полум'я для деяких вертикальних сталевих резервуарів в залежності від швидкості вітру.

$$\delta = \frac{D' - D}{D} 100\% = \frac{\Delta}{D} 100\%$$

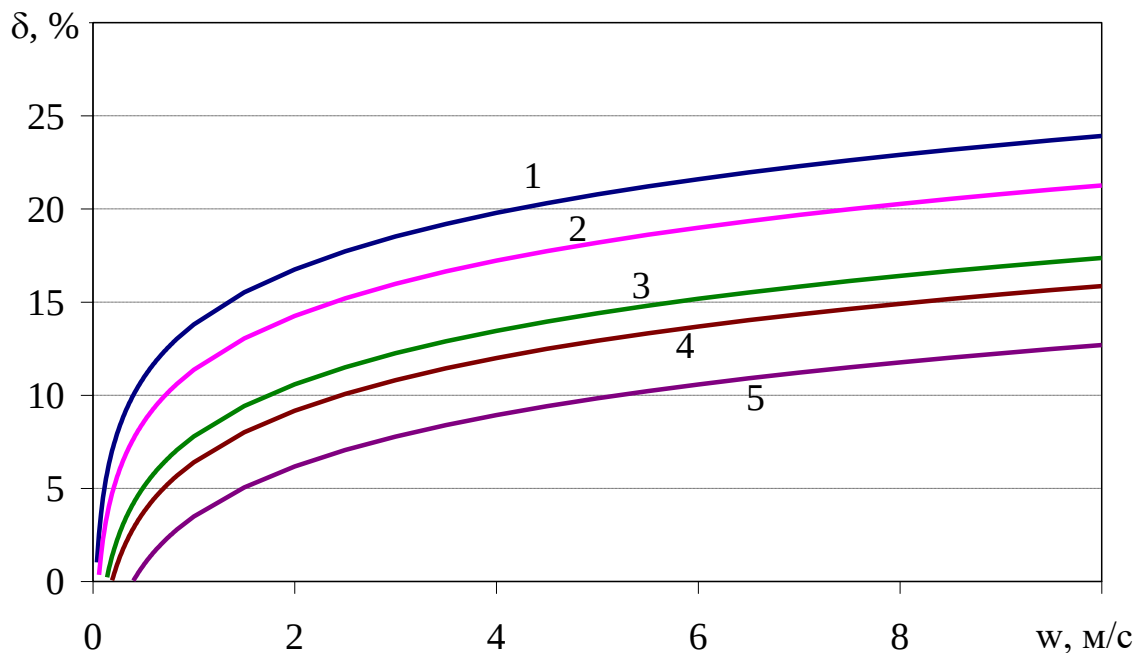


Рис. 2. Відносне розширення основи полум'я під впливом вітру для різних резервуарів: 1 – RBC-5000; 2 – RBC-10000; 3 – RBC-20000; 4 – RBC-30000; 5 – RBC-50000

В [17] запропоновано розглядати вісь полум'я такою, що виходить з центру еліпсу (рис. 3б). При цьому під впливом вітру нижня частини осі відхиляється від вертикальної осі на кут φ , а верхня – на кут $\varphi/2$. Загальна довжина осі полум'я і кут його нахилу описуються емпіричними залежностями

$$L = L_1 + L_2 = 10,615D \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03}; \quad (1)$$

$$\cos \varphi = (w^*)^{-0,5}, \quad (2)$$

де L_1 , L_2 – відрізки на вісі полум'я, що відповідають половині його висоти h (рис. 3); η – питома масова швидкість вигорання рідини; w^* – безрозмірна швидкість вітру:

$$w^* = \max \left\{ 1, w \left(\frac{\rho_a}{g\eta D} \right)^{1/3} \right\}; \quad (3)$$

w – швидкість вітру.

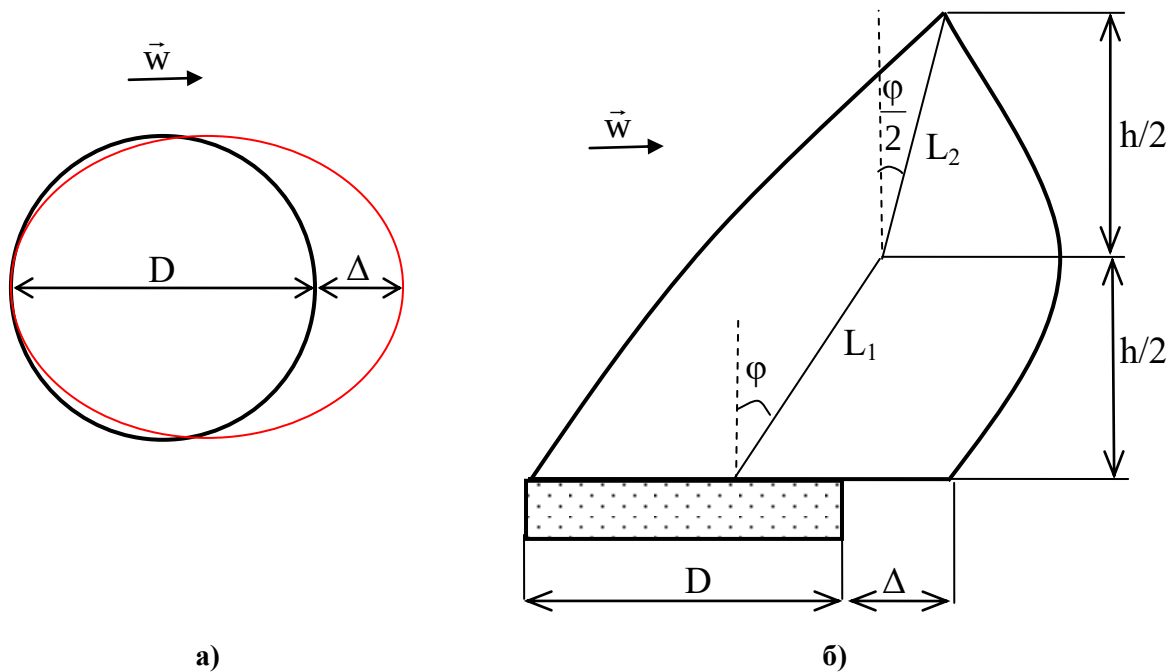


Рис. 3. Вплив вітру на полум'я над круговим розливом рідини: а – представлення основи полум'я еліпсом; б – нахил і розширення основи полум'я

Висота полум'я h може бути знайдена із співвідношень

$$L_1 + L_2 = L;$$

$$\frac{h}{2 \cos \varphi} + \frac{h}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} = L;$$

$$h = 2L \left[\frac{1}{\cos \varphi} + \frac{1}{\cos \varphi/2} \right]^{-1}. \quad (4)$$

Із залежностей (2), (3) випливає, що вітер відхиляє полум'я за умови

$$w \left(\frac{\rho_a}{g \eta D} \right)^{1/3} > 1;$$

$$w > \left(\frac{g \eta D}{\rho_a} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Із аналізу нерівності (5) випливає, що мінімальна швидкість вітру $w_{\min}$, при якій полум'я починає відхилятися від вертикальної вісі, залежить від питомої масової швидкості вигорання рідини і діаметра резервуара. Цю залежність проілюстровано на рис. 4.

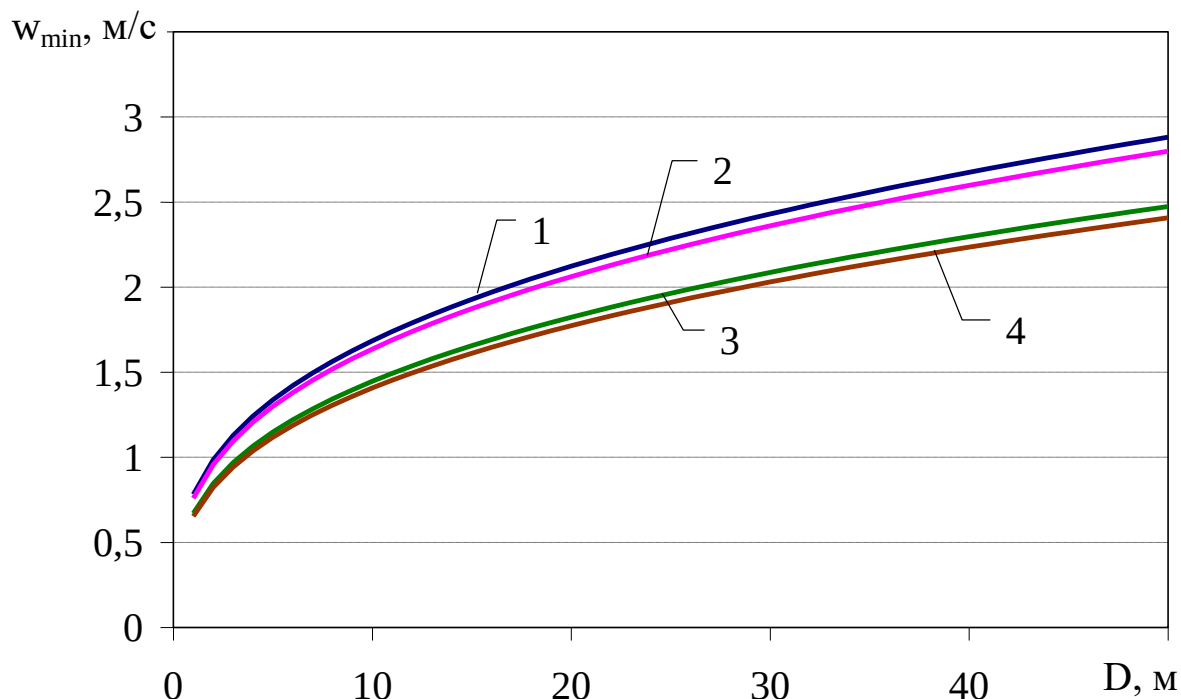


Рис. 4. Залежність мінімальної швидкості вітру, яка відхиляє полум'я, від діаметра резервуара для різних рідин: 1 – бензин ($\eta=0,06$ кг/(м²·с)); 2 – дизельне паливе ($\eta=0,055$ кг/(м²·с)); 3 – керосин ($\eta=0,038$ кг/(м²·с)); 4 – мазут ($\eta=0,035$ кг/(м²·с))

При значеннях швидкості вітру, менших ніж наведені на рис. 4, вісь полум'я залишається практично вертикальною.

5.2. Побудова рівняння випромінюючої поверхні полум'я у параметричній формі

Систему координат було обрано таким чином, що вертикальна вісь z співпадає з вертикальною віссю резервуара, а початок координат знаходиться в центрі його основи (рис. 5). Для побудови рівняння випромінюючої поверхні було прийнято, що довжина полум'я в довільній точці його основи $M(u, v, H)$ визначається відстанню r до межі основи

$$L(u, v) = 10,615 \cdot 2r \cdot \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03};$$

$$L(u, v) = 21,23r \cdot \left(\frac{\eta}{\rho_a \sqrt{gD}} \right)^{0,305} (w^*)^{-0,03}. \quad (6)$$

Тоді рівняння поверхні полум'я має вигляд

$$\begin{cases} x = u + L \sin \varphi \cos \alpha; \\ y = v + L \sin \varphi \sin \alpha; \\ z = h + L \cos \varphi, \end{cases} \quad \text{якщо } L \leq \frac{h}{2 \cos \varphi}; \quad (7)$$

$$\begin{cases} x = u + \left(\frac{h}{2} \operatorname{tg} \varphi + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right) \cos \alpha; \\ y = v + \left(\frac{h}{2} \operatorname{tg} \varphi + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \sin \frac{\varphi}{2} \right) \sin \alpha; \text{ якщо } L > \frac{h}{2 \cos \varphi}; \\ z = H + \frac{h}{2} + \left(L - \frac{h}{2 \cos \varphi} \right) \cos \frac{\varphi}{2}, \end{cases} \quad (8)$$

де H – висота резервуара; величина L розраховується за виразом (6); кут α визначається напрямком вітру (рис. 5).

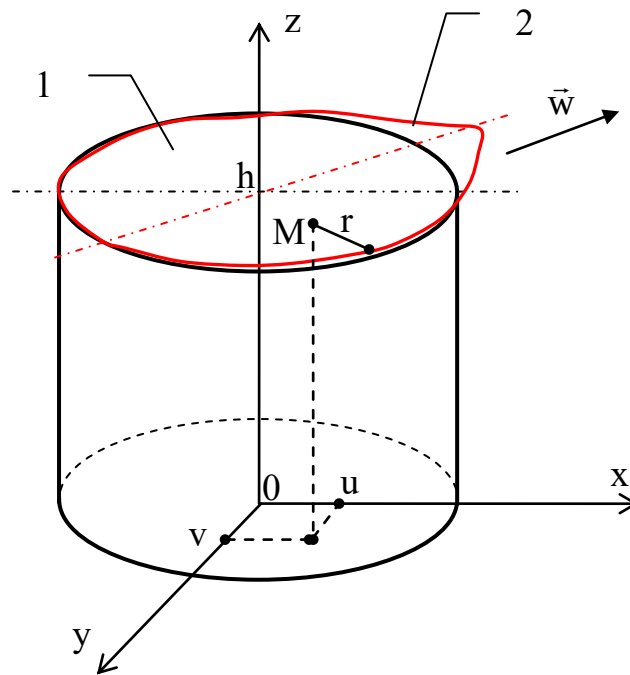


Рис. 5. Вибір системи координат: 1 – поверхня рідини в резервуарі, що горить; 2 – розширення основи полум'я в напрямку вітру

При горінні нафтопродуктів в резервуарах конвекційні потоки продуктів горіння і розігрітого повітря здійснюються вгору. Тому нагрів сусідніх об'єктів відбувається виключно за рахунок теплового випромінювання від пожежі. У випадку, що розглядається, тепловий потік випромінюванням буде мати 2 складові:

$$q = q_1 + q_2, \quad (9)$$

де q_1 – щільність теплового потоку випромінюванням від верхньої частини поверхні полум'я; q_2 – щільність теплового потоку випромінюванням від нижньої частини поверхні полум'я (рис. 3).

Щільність теплового потоку випромінюванням на елементарну площадку визначається законом Стефана–Больцмана

$$q_k = c_0 \varepsilon_f \varepsilon \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi_k; \quad k = 1, 2, \quad (10)$$

де $c_0=5,67 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$; ε_f – ступінь чорноти випромінюючої поверхні факела; ε – ступінь чорноти елементарної площадки, що нагрівається під тепловим впливом пожежі; T_f – температура випромінюючої поверхні факела; T – температура елементарної площадки; ψ_1, ψ_2 – коефіцієнти взаємного опромінення між елементарною площадкою і верхньою та нижньою частинами поверхні полум'я відповідно. Ці коефіцієнти залежить від форми полум'я і розташування елементарної площадки, що нагрівається:

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{r^2} dS, \quad (11)$$

де S – випромінююча поверхня полум'я; $\vec{r}$ – радіус вектор, що з'єднує точку на поверхні полум'я і елементарну площадку; φ_1 – кут між радіус-вектором $\vec{r}$ і нормальним вектором $\vec{n}_1$ до поверхні полум'я в даній точці; φ_2 – кут між радіус-вектором $\vec{r}$ і нормальним вектором $\vec{n}_2$ до елементарної площадки. Інтегрування у (11) відбувається лише по тих точках поверхні S , де нормальні вектори $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ утворюють гострі кути з вектором $\vec{r}$, тобто обидва множники в чисельнику підінтегральної функції (11) є додатними.

Косинуси кутів φ_1, φ_2 можуть бути представлені через скалярні добутки векторів

$$\cos \varphi_1 = \frac{(\vec{n}_1, \vec{r})}{|\vec{n}_1| \cdot |\vec{r}|}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{(\vec{n}_2, \vec{r})}{|\vec{n}_2| \cdot |\vec{r}|}, \quad (12)$$

Одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці (x, y, z) випромінюючої поверхні S факела має вигляд

$$\vec{n}_1 = \left(\frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}} \right), \quad (13)$$

де

$$A = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v} - \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v}; \quad B = \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial v}; \quad C = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial v} - \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial v}, \quad (14)$$

Якщо елементарна площадка, що піддається тепловому опроміненню від факела, знаходиться в точці (x_0, y_0, z_0) і має одиничний нормальний вектор

$$\vec{n}_2 = (n_x, n_y, n_z),$$

то вираз (11) з урахуванням (12) набуде вигляду

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{(\vec{r}, \vec{n}_1)(\vec{r}, \vec{n}_2)}{r^4} dS;$$

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_S \frac{[A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z)]}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2} [(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \times [n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0)] dS.$$

Виконавши заміну змінних (8), (10) і врахувавши, що

$$dS = \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} du dv,$$

Отримаємо

$$\psi = \frac{1}{\pi} \iint_{\Omega} \frac{[A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z)]}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} \times \\ \times [n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0)] du dv, \quad (15)$$

де (x_0, y_0, z_0) – точка, в якій знаходиться елементарна площадка; Ω – основа полум'я; інтегрування проводиться лише по тих точках (u, v) з області Ω , для яких обидва множники в квадратних дужках чисельника (15) є додатними.

Для нижньої частини поверхні полум'я (рис. 3) нормальний вектор має вигляд

$$\vec{n}_1 = (0, 0, -1).$$

Тоді вираз для коефіцієнта взаємного опромінення набуде вигляду

$$\psi_2 = \frac{H - z_0}{\pi} \iint_{\Omega'} \frac{[n_x(u - x_0) + n_y(v - y_0) + n_z(H - z_0)]}{[(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2 + (H - z_0)^2]^{\frac{3}{2}}} du dv, \quad (16)$$

де Ω' – основа полум'я за виключенням поверхні рідини.

5.3 Розробка алгоритму визначення щільності теплового потоку випромінюванням

Для обчислення частинних похідних (14) нескінченно малий приріст аргументу замінено скінченим приростом:

$$\frac{\partial f}{\partial u} \approx \frac{f(u + \Delta s, v) - f(u - \Delta s, v)}{2\Delta s}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial v} \approx \frac{f(u, v + \Delta s) - f(u, v - \Delta s)}{2\Delta s}, \quad (18)$$

де Δs – достатньо малий крок.

Тоді розрахунок щільності теплового потоку випромінюванням може бути проведений із використанням наступного алгоритму.

1. Обрати прямокутну область W , яка повністю містить в собі основу полум'я, наприклад, квадрат

$$W = \{(u, v): -F \leq u \leq F, -F \leq v \leq F\},$$

де

$$F = D' - \frac{D}{2}.$$

2. Обрати кількість вузлів N по кожній змінній і покрити область W регулярно сіткою (u_i, v_j) , $0 \leq i, j \leq N-1$, з кроком

$$\Delta w = \frac{2F}{N-1}.$$

3. Покласти $S = 0$; $i = 0$.

4. Покласти $j = 0$.

5. Якщо точка (u_i, v_j) не належить основі полум'я то перейти до кроку 14.

6. Обчислити (x, y, z) за формулами (6–8).

7. Із використанням співвідношень (13), (14) і формул чисельного диференціювання (17), (18), знайти нормальний вектор (A, B, C) до поверхні полум'я.

8. Обчислити ваговий коефіцієнт

$$k = \begin{cases} 0,25, & (i = 0 \vee i = N-1) \wedge (j = 0 \vee j = N-1); \\ 1, & i \neq 0 \wedge i \neq N-1 \wedge j \neq 0 \wedge j \neq N-1; \\ 0,5, & \text{other.} \end{cases}$$

9. Обчислити

$$\begin{aligned} m_1 &= A(x_0 - x) + B(y_0 - y) + C(z_0 - z); \\ m_2 &= n_x(x - x_0) + n_y(y - y_0) + n_z(z - z_0). \end{aligned}$$

10. Якщо $m_1 > 0$ та $m_2 > 0$, то

$$S := S + k \frac{m_1 m_2}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)]^{\frac{3}{2}}}.$$

11. Якщо точка (u_i, v_j) лежить всередині резервуара (на поверхні рідини), то перейти до кроку 14.

12. Обчислити

$$m_3 = n_x(u - x_0) + n_y(v - y_0) + n_z(H - z_0).$$

13. Якщо $m_3 > 0$, то

$$S := S + k \frac{m_3(H - z_0)}{\left[(u - x_0)^2 + (v - y_0)^2 + (H - z_0) \right]^{\frac{3}{2}}}.$$

14. Якщо $j < N-1$, то покласти $j := j+1$ та перейти до кроку 5.
15. Якщо $i < N-1$, то покласти $i := i+1$ та перейти до кроку 4.
16. Обчислити коефіцієнт взаємного опромінення:

$$\psi = \frac{1}{\pi} S \Delta w^2.$$

17. Обчислити щільність теплового потоку за формулою (10).

Застосування наведеного алгоритму дозволяє знайти щільність теплового потоку випромінюванням на довільно розташовану елементарну площадку. В якості прикладу на рис. 6 наведено розподіл щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом при швидкості вітру 3 м/с, направленою як показано на рис. 6.

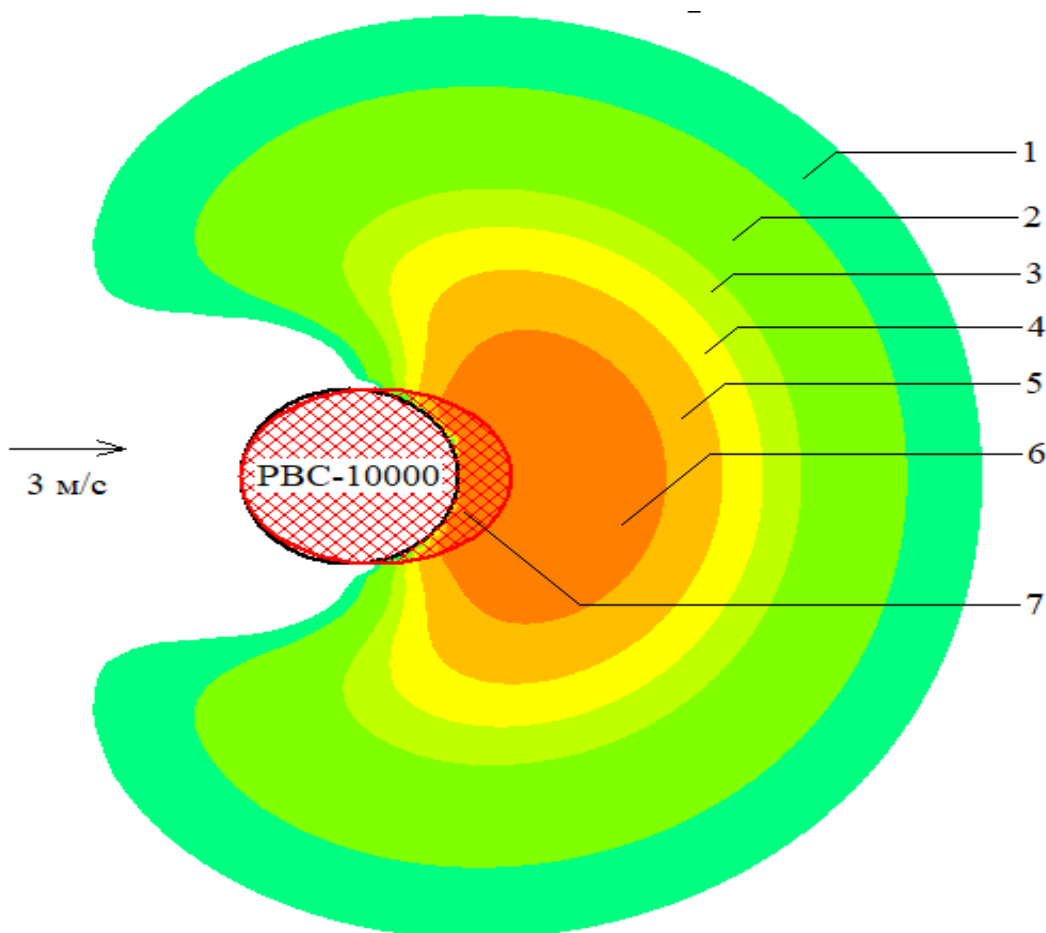


Рис. 6. Розподіл щільності теплового потоку випромінюванням на горизонтальну поверхню при пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом і швидкості вітру 3 м/с: 1 – $(3,0 \div 4,2)$ кВт/м² (бойовий одяг); 2 – $(4,2 \div 7,0)$ кВт/м² (бойовий одяг, до 5 хв); 3 – $(7,0 \div 8,5)$ кВт/м² (бойовий одяг змочений водою, до 5 хв); 4 – $(8,5 \div 10,5)$ кВт/м² (те саме, під захистом водяної завіси); 5 – $(10,5 \div 14,0)$ кВт/м² (тепловідбиваючий костюм, під захистом водяної завіси, до 5 хв); 6 – понад 14,0 кВт/м² (перебування неможливе); 7 – розширення основи полум'я в підвітряний бік

Аналіз розподілу на рис. 6 свідчить, що внаслідок вітрового впливу з підвітряного боку резервуара утворюється зона довжиною близько 70 м, щільність теплового потоку випромінюванням в якій становить $(3,0 \div 24,0)$ кВт/м². Це потребує відповідних засобів захисту особового складу, що приймає участь у локалізації і ліквідації пожежі.

6. Обговорення результатів моделювання теплового потоку від резервуарів з нафтопродуктами, що горять

Основним способом передачі тепла від пожежі в резервуарі до сусідніх об'єктів є теплопередача випромінюванням. Одним із способів оцінки щільності теплового потоку випромінюванням є апроксимація полум'я деякою 3-вимірною фігурою. Наявність вітру деформує полум'я, нахиляючи його і розширюючи його основу з підвітряного боку (рис. 1).

Аналіз залежності відносного розширення основи полум'я під впливом вітру (рис. 2) свідчить, що відносне розширення основи збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Наприклад, при швидкості вітру 4 м/с відносне розширення складає від 8 % (для резервуара РВС-50000) до 20 % (резервуар РВС-5000). Враховуючи, що нормативна відстань між резервуарами в резервуарній групі складає $0,75D$ (D – діаметр резервуара), то в найгіршому випадку відстань між полум'ям і сусіднім резервуаром може скоротитися до $0,55D$.

Внаслідок турбулентності, притаманній процесу горіння рідини, факел не має чіткої геометричної форми, для нього характерні постійні пульсації. Довжина полум'я і кут його нахилу можуть бути описані емпіричними залежностями (1–3). Із них випливає, що із збільшенням діаметра резервуара і питомої масової швидкості вигорання рідини довжина полум'я зростає, в кут нахилу зменшується. При цьому відхилення полум'я має місце лише за виконання умови (5), тобто існує таке граничне значення швидкості вітру, що при швидкостях вітру менше цього значення відхилення полум'я не відбувається (рис. 4).

Для апроксимації випромінюючої поверхні факела запропоновано використовувати емпіричні залежності (1–4) для оцінки довжини полум'я в довільній точці його основи (формула (6)), а не тільки в центрі. В цьому випадку рівняння випромінюючої поверхні полум'я може бути подано у вигляді (7), (8), де система координат пов'язана з резервуаром, в якому відбувається пожежа (рис. 5).

Одним із наслідків розширення основи полум'я з підвітряного боку за межі резервуара є те, що джерелом теплового випромінювання є як верхня (конусоподібна) частина поверхні полум'я, так і нижня – поверхня основи, що виходить за межі резервуара – формула (9). Щільність теплового потоку випромінюванням від деякої поверхні до даної елементарної площадки, що характеризується положенням в просторі і напрямом нормального вектора, описується законом Стефана–Больцмана (10). Основну складність для його застосування являє необхідність обчислення коефіцієнта взаємного опромінення, який визначається співвідношенням (11). Застосування формул (13), (14) до рівняння випромінюючої поверхні полум'я, поданої в параметричному вигляді (7), (8), дозволяє знайти нормальний вектор до поверхні полум'я в довільній точці і отримати вираз для коефіцієнта взаємного опромінення у вигляді (15). Для частини основи полум'я, що виходить за межі резервуара, вираз для коефіцієнта взаємного опромінення спрощується – формула (16).

За відсутності вітру резервуар і випромінююча поверхня полум'я утворюють опуклу тривимірну фігуру, внаслідок цього радіус-вектор від точки на поверхні полум'я до поверхні, що нагрівається, не може перетинати резервуар. Розширення основи полум'я і нахил його вісі під впливом вітру призводять до того, що зазначена фігура вже не буде опуклою, і буде виникати «тінь» від резервуара. Це означає при обчисленні інтегралів (15) і (16) необхідно додатково врахувати, що радіус-вектор від полум'я до площадки, що опромінюється, може перетинати поверхню резервуара.

Основну складність при розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням являє обчислення коефіцієнта взаємного опромінення ψ . Через складний вигляд функцій (6–8) аналітичне обчислення похідних (14) та інтеграла (15) є неможливим. Тому для їх обчислення є доцільним використання чисельних методів диференціювання та інтегрування.

Алгоритм розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням спирається на застосування методу трапецій при обчисленні інтегралів (15) і (16). Для цього квадратна область, що містить в собі основу полум'я, покривається регулярною сіткою (кроки 1, 2). Далі відбувається інтегрування (15), (16) за змінними u , v (кроки 3–15). При цьому компоненти нормального вектора до поверхні полум'я обчислюються шляхом апроксимації частинних похідних у вигляді (17), (18).

Застосування розробленого алгоритму до розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням на горизонтальну площадку на рівні землі від пожежі в резервуарі РВС-10000 з дизельним паливом (рис. 6) свідчить про утворення небезпечної зони з підвітряного боку резервуара. Отриманий розподіл щільності теплового потоку дозволяє провести зонування прилеглої місцевості і визначити необхідні засоби захисту особового складу, задіяного в локалізації і ліквідації пожежі (ДСТУ EN ISO 6942:2018). Аналіз розподілу на рис. 6 показує також утворення зони з особливо небезпечною величиною щільності теплового потоку (понад 14 кВт/м^2), знаходження особового складу у якій є неможливим. Виникнення такої зони є наслідком, як розширення основи полум'я в підвітряний бік, так і нахилу осі полум'я.

Перевагою запропонованого підходу є врахування особливостей деформації полум'я під впливом вітру при розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований лише у випадку, коли відсутні перешкоди між полум'ям і поверхнею, що нагрівається внаслідок теплового опромінення.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідні об'єкти.

7. Висновки

1. Під впливом вітру відбуваються нахил вісі полум'я і розширення його основи за межі резервуара. Кут відхилення факела від вертикальної вісі зростає із збільшенням швидкості вітру і спадає із зростанням діаметра резервуара і питомої масової швидкості вигорання. При цьому існує таке граничне значення швидкості вітру, що при значеннях швидкості менше нього відхилення полум'я практично не відбувається. Для резервуара РВС-5000 це граничне значення складає близько $2,2 \text{ м/с}$ для бензину і дизельного палива і $1,9 \text{ м/с}$ для мазуту та керосину. Для резервуара РВС-1000 – $2,4 \text{ м/с}$ і $2,0 \text{ м/с}$ відповідно.

2. Побудовано рівняння випромінюючої поверхні полум'я над резервуаром з нафтопродуктом, що горить. Запропонований підхід спирається на емпіричні залежності довжини полум'я від діаметру резервуара, питомої масової швидкості вигорання рідини, напрямку і швидкості вітру. Випромінююча поверхня є конусоподібною з основою у формі еліпса, витягнутого за межі резервуара з підвітряного боку. Відносне розширення основи полум'я за межі резервуара збільшується із зростанням швидкості вітру і зменшується із зростанням діаметру резервуара. Зокрема, при швидкості вітру 4 м/с відносне розширення складає від 8 % (для резервуара РВС-50000) до 20 % (резервуар РВС-5000).

3. Розроблено алгоритм визначення щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі в резервуарі. В основі алгоритму лежить покриття основи полум'я регулярною сіткою з подальшим застосуванням методів чисельного диференціювання для визначення нормального вектору до випромінюючої поверхні полум'я і методів чисельного інтегрування для оцінки коефіцієнта взаємного опромінення між полум'ям і площадкою, що нагрівається. Показано, що внаслідок розширення основи полум'я з підвітряного боку щільність теплового потоку сягає до 24 кВт/м^2 (при швидкості вітру 3 м/с), що обумовлює підвищену небезпеку як для сусідніх резервуарів, так і для особового складу, задіяного в локалізації і ліквідації пожежі.

Література

1. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами.
2. Landucci G., Salzano E., Taveau J., Spadoni G., Cozzani V. Detailed Studies of Domino Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. 2013. P. 229–243. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7
3. Ніжник В. В., Климась Р. В., Одинець А. В. Гасіння пожеж на складах нафти та нафтопродуктів в умовах ведення бойових дій. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції. С. 30–32.
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 2 місяці 2024 року. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/6/1/9/6/1/analitichna-dovidka-pro-pojeji-022024.pdf>
5. Гуліда Е. М., Козак Я. Я. Забезпечення пожежної безпеки в резервуарних парках зберігання нафти та нафтопродуктів. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2020. № 6(271–272). С. 69–75. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.69.700
6. Ференц Н. О., Вовк С. Я., Міллер О. В. Аналіз аварійних ситуацій і аварій в резервуарних парках складів нафти та нафтопродуктів. Пожежна безпека. 2017. № 31. С. 125–129. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2017_31_20
7. Домінік А. М., Нагірняк Ю. М., Фреюк Д. В. Аналіз досліджень негативного впливу теплового потоку від осередку пожежі на навколишні об'єкти. Пожежна безпека. 2024. Т. 45. С. 39–45. doi: 10.32447/20786662.45.2024.05
8. Бабаджанова О. Ф. Аналіз розвитку аварій на нафтобазі. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. 2019. С. 173–174. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6503/1/3.pdf>
9. Бойченко С. В., Калмикова Н. Г. Причинно-наслідковий взаємозв'язок

емісії вуглеводнів і втрат бензинів у горизонтальних резервуарах. Причини, фактори, джерела. Наукоємні технології. 2020. № 2. С. 218–235. doi: 10.18372/2310-5461.46.14810

10. Серікова О. М. Підвищення рівня екологічної безпеки території, прилеглої до місць розташування резервуарів рідких вуглеводнів. Техногенно-екологічна безпека. 2023. № 14(2). С. 50–57. doi: 10.52363/2522-1892.2023.2.6

11. Хаткова Л., Дагіль В., Дагіль І. Кількісна оцінка ризику виникнення пожеж на резервуарах з нафтою і нафтопродуктами від самозаймання пірофорних відкладень. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2022. Т. 6. № 2. С. 101–108. doi: 10.31731/2524.2636.2022.6.2.101-107

12. Савіновська В. І., Федоряк Н. В., Лялюк-Вітер Г. Д. До питання забезпечення пожежної безпеки об'єктів підвищеної небезпеки в умовах війни. Матеріали V Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. С. 197–200.

13. Liu C., Ding L., Jangi M., Ji J., Yu L., Wan H. Experimental study of the effect of ullage height on flame characteristics of pool fires. Combustion and Flame. 2020. Vol. 216. P. 245–255. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.03.009

14. Xu L., Lu Y., Ding C., Guo H., Liu J., Zhao Y. A generic flame shape model and analytical models for geometric view factor calculation on the fire exposure surface. International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 173. P. 107392. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107392

15. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects. Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference. 2011. doi: 10.26021/1472

16. Sasaki K. View factor of a spheroid and an ellipse from a plate element. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2024. Vol. 326. P. 109102. doi: 10.1016/j.jqsrt.2024.109102

17. Pritchard M. J., Binding T M. FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. IChemE Symposium. 1992. 130. P. 491–505.

O. Basmanov¹, DSc, Professor, Leading Researcher of the Department

D. Karpova¹, Lecturer of the Department

Ye. Morshch², DSc, Head of the Department of Scientific and Technical Expertise

S. Harbuz¹, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

V. Benediuk¹, Senior Researcher of the Department

O. Zazymko¹, Researcher of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²State Research Institute of Cybersecurity and Information Protection Technologies, Kyiv, Ukraine

MODELING OF HEAT FLOW FROM BURNING OIL TANKS

A model was developed to determine the density of heat flux by radiation from a fire in a vertical steel tank with an oil product. The model takes into account the deformation of the flame under the influence of wind: the tilt of the flame axis and the expansion of its base to leeward. The proposed approach is based on the known empirical dependencies of the flame length and the angle of its deviation from the vertical axis depending on wind speed, specific mass burn rate of the liquid, and tank diameter. These dependencies are used to determine the flame length at an arbitrary point on the flame base. This makes it possible to construct the equation of the radiating surface of the flame in a parametric form. The resulting surface has a conical shape with an elliptical base extended beyond the tank from the leeward side. The relative expansion of the flame base outside the tank increases with the wind speed and decreases with the diameter of the tank. An algorithm for calculating the heat flux density by radiation

from a flame to an arbitrary site given by spatial coordinates and a normal vector has been developed. The algorithm uses the coverage of the flame base with a regular grid, followed by the application of numerical differentiation methods to determine the normal vector to the radiating surface of the flame and numerical integration methods to estimate the view factor between the flame and the site heated by the fire. It is shown that the expansion of the tank base leads to a significant increase in the heat flux density on the leeward side of the tank. The results obtained can be used to determine the consequences of the thermal impact of the fire on neighboring oil tanks and other process equipment, as well as to determine the safe location zones for equipment and personnel involved in localizing and eliminating the fire.

Keywords: fire of flammable liquid, radiating surface of the flame, thermal radiation flux

References

1. NAPB 05.035 – 2004. Instruction on extinguishing fires in tanks with oil and oil products.
2. Landucci, G., Salzano, E., Taveau, J., Spadoni, G., Cozzani, V. (2013). Detailed studies of domino scenarios. Domino effects in the process industries, 229–243. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00011-7
3. Nizhnyk, V. V., Klymas, R. V., Odynets, A. V. (2022). Extinguishing fires at oil and oil product warehouses under combat conditions. Theory and practice of fire extinguishing and emergency situations: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, 30–32.
4. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 2 months of 2024. Available at: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/0/6/1/9/6/1/analitchna-dovidka-pro-pojeji-022024.pdf>
5. Hulida, E. M., Kozak, Y. Y. (2020). Ensuring fire safety in oil and oil products storage tank parks. Bulletin of the Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 6, 69. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.241120.69.700
6. Ferents, N. O., Vovk, S. Ya., Miller, O. V. (2017). Analysis of emergency situations and accidents in oil and oil product storage tank parks. In Y. Ya. Kozak (Ed.), Fire safety, 31, 125–129. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2017_31_20
7. Dominik, A. M., Nahirniak, Yu. M., Freyuk, D. V. (2024). Analysis of studies of the negative impact of thermal flow from the fire source on surrounding objects. Fire Safety, 45, 39–45. doi: 10.32447/20786662.45.2024.05
8. Babadjanova, O. F. (2019). Analysis of the development of accidents at the oil depot. In Theory and practice of firefighting and emergency situation liquidation: Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference, 173–174. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/6503/1/3.pdf>
9. Boichenko, S. V., Kalmykova, N. G. (2020). Causal relationship between hydrocarbon emissions and gasoline losses in horizontal tanks. Science-Intensive Technologies, 2, 218–235. doi: 10.18372/2310-5461.46.14810
10. Serikova, O. M. (2023). Improving the level of environmental safety in areas adjacent to liquid hydrocarbon storage tanks. Technogenic and Environmental Safety, 14(2), 50–57. doi: 10.52363/2522-1892.2023.2.6
11. Khatkova, L., Dagil, V., Dagil, I. (2022). Quantitative risk assessment of fire occurrence in oil and oil product tanks due to the spontaneous ignition of pyrophoric deposits. Emergencies: Prevention and Elimination, 6(2), 101–108. doi: 10.31731/2524.2636.2022.6.2.101-107
12. Savinovska, V. I., Fedolyak, N. V., Lialyuk-Viter, H. D. (2024). On the issue of ensuring fire safety of high-risk objects in wartime conditions. In Proceedings of the

V International Scientific and Practical Internet Conference, 197–200.

13. Liu, C., Ding, L., Jangi, M., Ji, J., Yu, L., Wan, H. (2020). Experimental study of the effect of ullage height on flame characteristics of pool fires. *Combustion and Flame*, 216, 245–255. doi: 10.1016/j.combustflame.2020.03.009

14. Xu, L., Lu, Y., Ding, C., Guo, H., Liu, J., Zhao, Y. (2022). A generic flame shape model and analytical models for geometric view factor calculation on the fire exposure surface. *International Journal of Thermal Sciences*, 173, 107392. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107392

15. Fleury, R. (2011). Evaluation of Thermal Radiation Models for Fire Spread Between Objects. *Proceedings, Fire and Evacuation Modeling Technical Conference*. doi: 10.26021/1472

16. Sasaki, K. (2024). View factor of a spheroid and an ellipse from a plate element. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 326, 109102. doi: 10.1016/j.jqsrt.2024.109102

17. Pritchard, M. J., Binding, T. M. (1992). FIRE2: A New Approach for Predicting Thermal Radiation Levels from Hydrocarbon Pool Fires. *ICHEME Symposium*, 130, 491–505.

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 15.04.2025

А. А. Карпов, ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)

М. В. Кустов, д.т.н., професор, нач. наук.-дослідн. лаб. (ORCID 0000-0002-6960-6399)

Р. В. Корнієнко, к.т.н., с.д., пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)

О. О. Іваненко, PhD, нач. каф. (ORCID 0009-0006-8566-0084)

Д. С. Шаріпова, к.псих.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9926-6041)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МЕТОДУ ДЕТЕКЦІЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Розроблена детальна функціональна схема електромагнітного детектора вибухонебезпечних предметів, яка базується на високопродуктивному цифровому процесорі типу Blackfin. Апаратна частина детектора включає випромінюючу антену, яка генерує електромагнітні хвилі, та приймаючу антену, що реєструє відбитий сигнал. Також до її складу входять блок підсилення сигналу, система автоматичного регулювання підсилення, яка забезпечує стабільність сигналу при змінних умовах середовища, цифро-аналогові та аналого-цифрові перетворювачі для обробки сигналів у цифровій формі, а також блок таймінгів, що синхронізує всі апаратні компоненти. Така архітектура дозволяє здійснювати ефективний збір та обробку даних з високою швидкістю передавання та забезпечує оперативне оновлення синхроімпульсів для перетворювачів. На основі розробленого прототипу детектора була проведена комплексна експериментальна перевірка, метою якої було підтвердження адекватності раніше створених теоретичних моделей, описаних у попередніх дослідженнях. Експерименти показали, що електромагнітні властивості середовища, зокрема рівень обводненості ґрунту, а також геометричні параметри вибухонебезпечного об'єкта і його конструктивні особливості, істотно впливають на результати детектування. Аналіз радіолокаційних зображень, отриманих під час тестування детектора на зразках мін типу ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62, підтвердив ефективність розробленого підходу. Зокрема, детектор демонструє здатність виявляти міну ТМ-62 на глибинах до 50 см, а для протипіхотних мін (ПМН-2 та ПФМ-1) ефективна глибина детектування становить до 20 см. Ці показники повністю відповідають тактичним вимогам до виявлення протипіхотних та протитанкових мін. Для подальшого підвищення точності розпізнавання та роздільної здатності сигналів пропонується застосування сучасних математичних моделей та методів обробки потоку даних.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети, гуманітарне розмінування, електромагнітне випромінювання, радіолокаційна карта

1. Вступ

Стан мінної безпеки в Україні залишається критичним через масштабне замінування територій унаслідок військових дій. На сьогодні потенційно небезпечними є понад 140 тисяч квадратних кілометрів, що потребують гуманітарного розмінування. Основні зусилля зосереджені на звільнених територіях, де піротехнічні підрозділи активно очищують землі від мін і вибухонебезпечних залишків. За інформацією станом на 2024 рік, знешкоджено понад 117 тисяч вибухонебезпечних предметів (ВНП), очищено дороги, залізничні шляхи та інші важливі об'єкти інфраструктури [1].

Пріоритетними залишаються аграрні землі, адже відновлення їхньої безпеки є важливим для стабілізації економіки. Використовуються сучасні технології, зокрема дрони, георадари та роботизовані системи, що пришвидшують процес і зменшують ризики для саперів. Однак робота ускладнюється через активні бойові дії та масштабність забруднених територій. Повне розмінування може зайняти десятиліття, але частина територій планується очистити протягом кількох років завдяки підтримці міжнародних організацій і передовому обладнанню.

Окрім України досвід гуманітарного розмінування активно накопичується в різних країнах світу. Зокрема, Камбоджа є однією з найбільш забруднених мінними полями країн, де працюють як місцеві, так і міжнародні організації. В Афганістані для розмінування активно застосовують інноваційні технології, зокрема дрони. У Колумбії проблема мінування виникла через тривалий збройний конфлікт, і процес очищення територій залишається складним. Хорватія демонструє технологічно розвинені підходи до розмінування, напрацьовані після війни на Балканах.

Гуманітарне розмінування в Україні регламентується низкою документів. Основним є Закон України «Про протимінну діяльність в Україні», ухвалений у 2019 році. Також застосовуються міжнародні стандарти протимінної діяльності (IMAS), які визначають загальні правила та підходи до розмінування. Україна є учасницею Оттавської конвенції, що забороняє використання протипіхотних мін. Крім того, діяльність у цій сфері регулюється наказами Міністерства оборони України.

В Україні гуманітарним розмінуванням займаються різні організації, як міжнародні, так і національні. Серед них – Міжнародний комітет Червоного Хреста (ICRC), який надає допомогу постраждалим у конфліктах. Британська благодійна організація The HALO Trust та група MAG (Mines Advisory Group) спеціалізуються на виявленні та знешкодженні мін у різних країнах світу. В Україні ці завдання виконує Державна спеціальна служба транспорту, а також активну роль у розмінуванні відіграє Організація з безпеки і співробітництва в Європі (ОБСЄ). Однак незважаючи на активну роботу цих організацій основне навантаження по виявленню та знешкодженню вибухонебезпечних предметів несе ДСНС України.

Щоб зменшити небезпеку при проведенні розмінування, важливо забезпечити якісну підготовку персоналу, який займається цими роботами. Використання дистанційних технологій, таких як дрони та роботи, дозволяє мінімізувати ризики для людей. Також необхідно суворо дотримуватись міжнародних стандартів безпеки та застосовувати сучасне обладнання, яке підвищує ефективність і безпечність процесу. Крім того, інформування місцевого населення про наявність небезпечних зон є ключовим заходом для запобігання випадковим травмам і нещасним випадкам.

Однак гуманітарне розмінування стикається з низкою проблем. По-перше, це значні площі забруднених територій, які потребують очищення. По-друге, обмеженість ресурсів, зокрема фінансування, спеціалізованого обладнання та кваліфікованого персоналу. Третім викликом є високий рівень небезпеки для фахівців, які виконують ці роботи. Крім того, недостатня обізнаність населення про ризики мін також ускладнює ситуацію. Останньою проблемою є значна тривалість процесу розмінування, що вимагає багато часу.

Таким чином, відсутність ефективних методів та способів для швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Більшість систем електромагнітного зондування предметів на землі працюють у діапазоні довжин хвиль, порівнянному з їхніми розмірами, що відрізняє їх від класичних радіолокаційних систем. Антена може перебувати близько до поверхні відбиття (ближнє поле, індукційна передача) або працювати

в далекому полі. Основні технічні проблеми – високий рівень перешкод на малих відстанях і низьке співвідношення сигнал/шум, що ускладнює проектування таких систем [2, 3].

Радіолокаційні системи ближнього зондування поверхні землі діляться на два типи: ті, що працюють у тимчасовій області (передають імпульси й аналізують відбитий сигнал) і в частотній області (сканують окремі частоти). Ручні електромагнітні сканери використовують переносні антени, що переміщуються за заданим маршрутом, створюючи радіолокаційні зображення або звукові попередження про ціль. Транспортні та повітряні системи застосовують великі антени і рух платформи для збору даних, що обробляються методами SAR [4].

Через значні втрати на шляху поширення електромагнітних хвиль у ґрунті довжина хвилі випромінювання, що випускається, перевищуватиме або матиме той самий порядок величини, що й розмір міни. У той час як звичайні радіолокаційні системи працюють на довжинах хвиль, де розмір цілі зазвичай набагато більший за довжину хвилі падаючого випромінювання, радары для сканування поверхні землі працюють в діапазоні від Релея до Мі (або резонансу). Сумарні втрати на кількох довжинах хвиль можуть сягати 100 дБ для деяких матеріалів, а сумарне петлеве посилення таких радарів не перевищує 120 дБ, тому перед розробниками стоїть завдання виявлення ознак наземних предметів за дуже короткий час, зазвичай у межах 20 наносекунд [5]. Відбиття електромагнітної енергії від наземних предметів зумовлене відмінностями в імпедансі наземних мін порівняно із земними матеріалами. Земля містить значну кількість радіолокаційних розсіювачів, таких як каміння, нори тварин і штучне сміття, що призводить до того, що радар стикається з дуже високими рівнями перешкод на коротких відстанях. Подолання цієї проблеми і досягнення адекватного співвідношення сигнал/шум є серйозним технічним завданням. Автор роботи [6] надає більш детальну інформацію про проблеми проектування, пов'язані з виявленням наземних дрібних предметів.

Зображення що формує наземна система електромагнітного сканування, відрізняється від оптичного через порівнянню з об'єктом сканування довжину хвиль, що знижує чіткість і залежить від властивостей ґрунту. Широка діаграма спрямованості, рефракція та анізотропія погіршують роздільну здатність, але її можна поліпшити за допомогою синтезованої апертури. Віддзеркалення виникає через різницю імпедансу цілі та ґрунту; більшість ґрунтів мають діелектричну проникність 2–25, тоді як прісна вода ($\epsilon \approx 80$) дає змогу виявляти об'єкти, на відміну від солоної води [7]. Ґрунт часто неоднорідний, створюючи перешкоди, які важливо враховувати для ефективності радара.

Необроблені радарні зображення містять «яскраві плями» через внутрішні віддзеркалення та спотворення пропорцій через варіації швидкості. Симетричні об'єкти, наприклад сфери, створюють гіперболічні відображення [8]. Обробка даних компенсує ці ефекти, зазвичай в автономному режимі. Георадар може використовувати поляризоване випромінювання для точного виявлення цілей. В роботі [9] розглядаються обмеження радіолокації для пошуку мін і три режими роботи антени: проксимальний (близько до землі), середній (на кілька довжин хвиль) і дистанційний (на значній відстані).

У реактивному ближньому полі енергія залишається в електромагнітних полях біля джерела, не випромінюючись. Натомість відбувається обмін енергією,

і якщо ціль її поглинає, сигнал уловлюється антеною. Точні вимірювання ближнього поля георадарних антен розглянуто в роботі [10]

Радіолокаційні системи вільного простору повинні враховувати лише явища поширення через атмосферу [11, 12]. В роботі показано, що електромагнітні хвилі послаблюються в природних середовищах через втрати в електричному і магнітному полях. У більшості випадків магнітний відгук ґрунту незначний, але в ґрунтах із високим вмістом заліза або вулканічних породах його враховувати необхідно.

В попередніх роботах нами проведено моделювання процесу розповсюдження електромагнітної хвилі у ґрунті із вибухонебезпечним предметом [13]. При цьому враховано процеси відбиття та поглинання хвиль багатопаровими поверхнями ВНП [14] при довільному куті їх падіння. Окрему увагу приділено визначенню діелектричних властивостей матеріалів ВНП [15], що дозволяє підвищити точність детектування та відсортувати хибні сигнали. Отримані моделі успішно пройшли перевірку на працездатність та дозволяють вирішувати поставлені задачі, однак без експериментальної перевірки їх адекватності та достовірності результатів моделювання їх використання суттєво обмежується в практичній галузі. Окрім цього потребує експериментальної перевірки сам метод ідентифікації ВНП з різними характеристиками в реальних умовах.

Таким чином невирішеною частиною проблеми є відсутність експериментальної перевірки методу електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів та теоретичних моделей цього процесу.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є експериментальна перевірка працездатності електромагнітного методу детекції вибухонебезпечних предметів та теоретичних моделей розповсюдження електромагнітних хвиль.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Розробити функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів.
2. Експериментально перевірити адекватність розроблених теоретичних моделей.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є прийнятий сигнал, отриманий шляхом відбиття випроміненого сигналу електромагнітних хвиль неоднорідностями у ґрунті. В якості основних об'єктів опромінення використовувались деактивовані ВНП найбільш поширених типів.

Протипіхотні міни:

ПФМ-1 («Пелюстка») – невеликі фугасні міни, які розкидаються касетними боеприпасами. Вони малопомітні та часто спричиняють каліцтва, особливо серед дітей, через схожість із іграшками.

ПМН-2 – фугасні міни натискної дії, що активуються при наступанні ногою.

ОЗМ-72 («Міна-жаба») – осколкова міна кругового ураження, яка підстрибує при спрацьовуванні.

Протитанкові міни:

ТМ-62 – використовуються для ураження транспортних засобів. Активуються при значному навантаженні.

ПОМ-3 («Медальйон») – новий тип міни з сейсмічним датчиком, що виявляє наближення людини та вибухає.

Предметом дослідження є процес взаємодії (проходження, поглинання, відбиття) електромагнітної хвилі вказаних параметрів із поверхнею ВНП.

Висувається гіпотеза про отримання радіолокаційного сигналу відбиття з достатньою ступеню роздільної здатності для ідентифікації основних типів ВНП у ґрунті з різними характеристиками. Це дозволить оцінити можливість адаптації параметрів промислових георадарів з метою їх використання для практичного виявлення ВНП при гуманітарному розмінуванні.

В якості тестового технічного засобу використовувався георадар VIY5-900 призначений для підповерхневого зондування використовуючи імпульсне електромагнітне випромінювання. Прилад дає змогу досягати глибини зондування до 2 метрів за певних умов.

5. Розробка функціональної схеми електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів

З метою експериментальної перевірки отриманих теоретичних моделей та визначення практичних можливостей електромагнітного методу детектування вибухонебезпечних предметів в роботі розроблена функціональна схема наземного детектору. Основними вимогами при побудові функціональної схеми було реалізація можливості трансформації отриманих аналогових сигналів у цифровий формат, порівняння фаз та амплітуд вихідного та вхідного сигналу та можливість формування візуалізаційної картини прийнятого сигналу та його збереження. Розроблена функціональна схема представлена на рис. 1.

На рис. 1 наведено функціональну схему радіолокаційного модуля, який складається з двох основних вузлів – радіочастотного і цифрового. Радіочастотний вузол класично представлений приймаючою (1, рис. 1) і передаючою антенами (16, рис.1), відповідно, фідерною системою і модулями приймаючого і передаючого підсилювачів.

Основою цифрового вузла виступає цифровий процесор (8, рис.1). В роботі [4] показано, що в якості цифрового процесору можна використовувати процесори Blackfin від виробника Analog Devices. З процесором пов'язані оперативна пам'ять, двоспрямований інтерфейс керування та пристрої виведення аудіо- і цифрового потоків (10, 11 рис. 1).

Цифровий процесор через модуль синхронізації передає цифровий код, відповідний потрібному таймінгу (часовому інтервалу), у вузол формування таймінгів, який, у свою чергу, визначає час роботи генератора імпульсів. Сформований у такий спосіб пакет імпульсів через передавальний підсилювач (підсилювач потужності) і фідерну систему надходить на передавальну антену і випромінюється в простір.

У разі потрапляння переданого сигналу на неоднорідний предмет із чітко виділеною поверхнею розділу між різними матеріалами (міну), він відбивається від нього і приймається приймальною антеною. Сигнал з антени надходить на обробку в блок посилення сигналу (БПС), що змінюється в часі, який слугує для компенсації геометричної втрати діапазону на кожному кроку діапазону, і представляє за своєю суттю систему автоматичного регулювання посилення (АРП), керовану за допомогою цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Необхідні для роботи блоку БПС параметри формуються процесором 8.

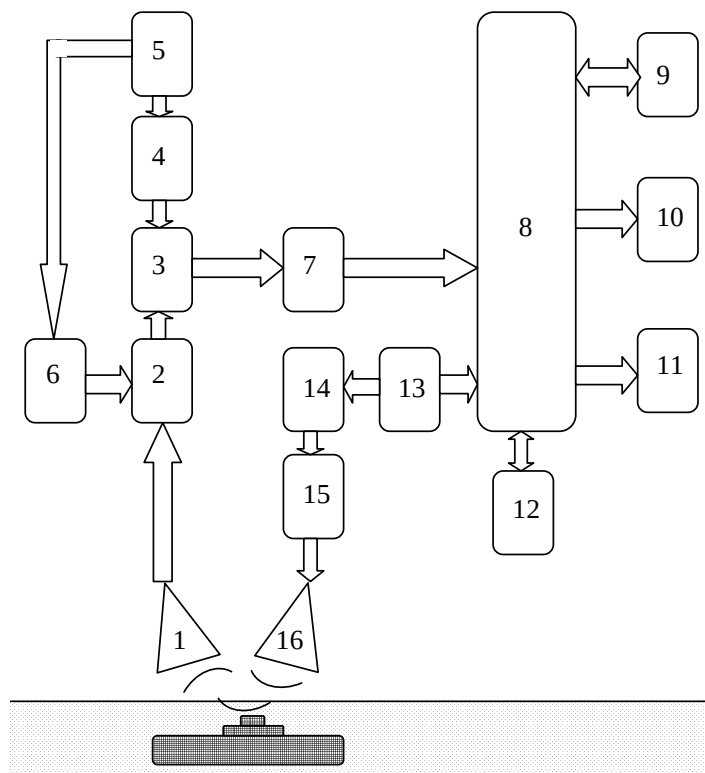


Рис. 1. Функціональна схема радіолокаційного модуля для електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів: 1 – приймаюча антена; 2 – підсилення сигналу, що змінюється у часі; 3 – відбір та затримка сигналу; 4 – блок таймінгів; 5, 6 – цифрово-аналоговий перетворювач; 7 – аналогово-цифровий перетворювач; 8 – цифровий процесор; 9 – інтерфейс керування; 10 – вивід аудіо сигналів; 11 – вивід візуалізованих даних; 12 – блок пам'яті; 13 – модуль синхронізації; 14 – цифровий вузол формування інтервалів затримки; 15 – генератор імпульсів електромагнітного випромінювання; 16 – передаюча антена

З блоку БПС сигнал надходить на блок вибірки і зберігання (затримки), інформація про прийнятий сигнал, з якого за допомогою аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) перенаправляється в процесор для подальшої цифрової обробки згідно з алгоритмом розпізнавання.

Блок вибірки і зберігання (затримки), своєю чергою, керується і синхронізується за допомогою блоку таймінгів (4, рис. 1) сигналами, що надходять із трьох цифро-аналогових перетворювачів. Цифровий процесор, за допомогою програмного забезпечення, формує необхідні для роботи сигнали.

Дискретизація здійснюється шляхом послідовного збільшення інтервалу повторення імпульсів дискретизації з кожним інтервалом повторення імпульсів аж до досягнення 512 відліків, після чого процес повторюється. Наприклад, крок дискретизації 50 пс додається до зразкового (обраного еталонного) інтервалу повторення імпульсів, що дає змогу запобігти дискретизації прийнятого сигналу через рівні проміжки часу. Використання для створення послідовності пакетів імпульсів повільного темпу, що генерується цифровим способом, і швидкого темпу, що генерується аналоговим способом, дає змогу формувати дискрети з інкрементною синхронізацією.

Як вже було зазначено, програмне забезпечення радару розробляється під відповідну архітектуру процесору і відповідає за збір даних з повною швидкістю

передавання даних 16 Мбіт/с^{-1} , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і загальні адміністративні завдання. На додаток до цього процесор виконує алгоритми обробки сигналів, які перетворюють радіолокаційні дані в звук кожні 16 мс. Інші завдання включають в себе зв'язок з іншими пристроями, підключеними до плати радара. Радар споживає може споживати до 2,3 Вт і буде містити усю обробку, необхідну для забезпечення звукового попередження про мінну ціль, як показано на рис. 1.

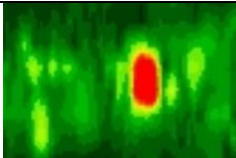
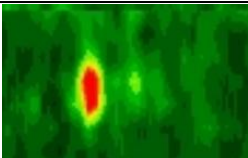
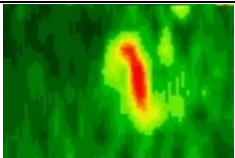
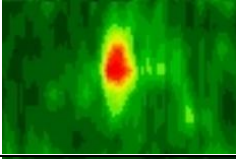
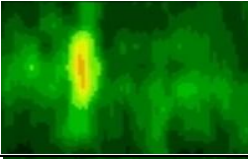
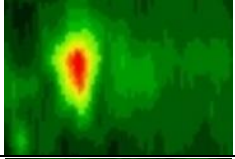
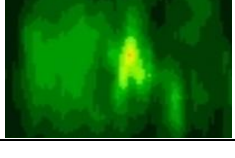
Додаткове використання часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів. Можливість використання цих підходів для вирішення подібних задач продемонстровано в роботах [7–9].

6. Експериментальна перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей

Експериментальна перевірка адекватності розроблених теоретичних моделей проводилась за наступною методикою. У ґрунті розмішували вибухонебезпечний предмет та проводили проїзд електромагнітним детектором над місцем розміщення ВВП. Для підтвердження отриманих результатів при однакових умовах проводилось три проїзди та знімалась зображення радіолокаційної карти.

Під час експерименту у якості ВВП використовували три види мін: ПФМ-1 («Пелюстка») – фугасна міна, із невеликими розмірами та незначним вмістом металевих конструкційних елементів; ПМН-2 – фугасна міна натискної дії із пластиковим корпусом; ТМ-62 – велика протитранспортна міна із металевим корпусом. Результати експериментальних досліджень представлені у табл. 1 – табл. 3.

Табл. 1. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПФМ-1

Глибина/ Ґрунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Вибухонебезпечні предмети розміщувались на глибинах – 5 см, 20 см, 50 см. Більшу глибину розглядати недоцільно так, як на більшій глибині при гуманітарному розмінуванні такі міни практично не зустрічаються. Окрім цього із глибиною потужність відбитого сигналу падає настільки, що такі невеликі міни без металевої оболонки, як ПФМ-1 та ПМН-2 детектувати за допомогою електромагнітного методу технічно практично неможливо.

Табл. 2. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ПМН-2

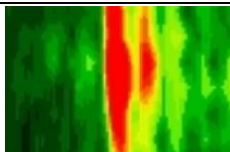
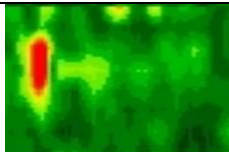
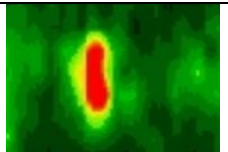
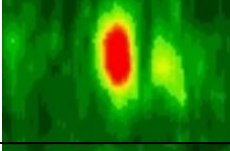
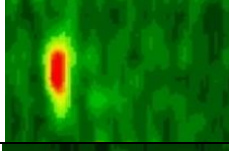
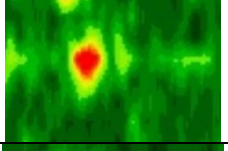
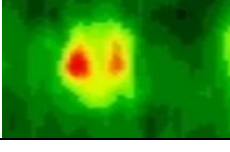
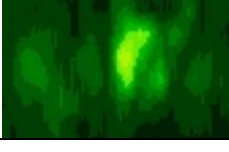
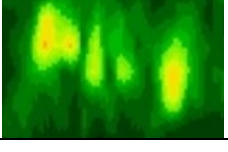
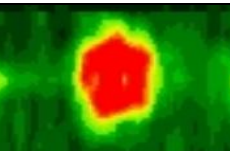
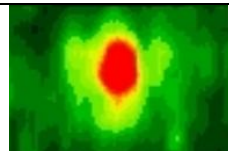
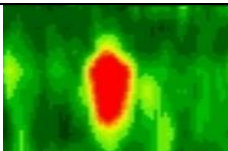
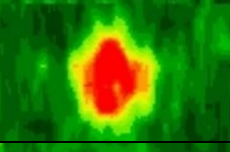
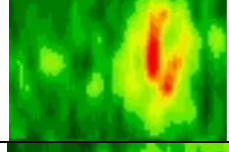
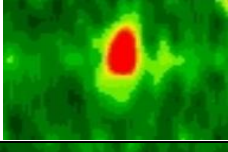
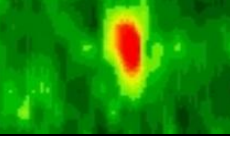
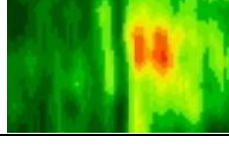
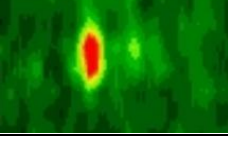
Глибина/ Грунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Табл. 3. Радіолокаційні карти електромагнітного детектування міни ТМ-62

Глибина/ Грунт	Сухий пісок	Мокрий пісок	Суглинок
5 см			
20 см			
50 см			

Також при експериментальному дослідженні розглядалось три види ґрунту – сухий пісок, мокрий пісок та суглинок. Ці види ґрунтів є найбільш розповсюдженими

7. Обговорення результатів експериментальної перевірки адекватності розроблених теоретичних моделей

Аналіз радіолокаційних карт електромагнітного детектування вибухонебезпечних предметів (табл. 1 – табл. 3) показує, що для усіх типів мін у мокрому піску спостерігається найгірша якість детектування. Це пояснюється високим коефіцієнтом поглинання електромагнітних хвиль вологовмісних середовищ. Гірша якість детектування для суглиноків у порівнянні з сухим піском також пояснюється наявністю більшого вмісту води саме у суглинках.

Як і очікувалось найбільш чітку радіолокаційну карту має міна ТМ-62 (табл. 3). За рахунок своїх великих розмірів та металевої оболонки такі міни можна детектувати на глибинах до 50 см, а на глибині до 20 см «плями» відбиття мають чіткі контури навіть без застосування додаткових фільтрів.

Радіолокаційні карти для мін ПФМ-1 (табл. 1) показали, що їх стійке детектування можливо лише на глибинах до 20 см для всіх видів ґрунтів. Також як видно з табл. 1 для детектування на таких глибинах для ґрунтів із великим вмістом води вже необхідним є використання спеціальних фільтрів та алгоритмів обробки сигнала.

лу. Представлені радіолокаційні карти для глибин 20 см ще можна обробити в умовах полігону, коли заздалегідь відомі місця розміщення мін. В реальних умовах результати детектування будуть гіршими. Видно, що для таких протипіхотних мін навіть для умов полігону на глибинах більше 50 см практично не вдалось отримати стійкого сигналу відбиття та отримані результати можна віднести до «шумів».

Протипіхотна міна ПМН-2 (табл. 2) має більш якісні карти електромагнітного детектування у порівнянні з ПФМ-1 (табл. 1). Виходячи з того, що вміст металевих компонент у цих двох мінах приблизно однаковий, це чітко вказує на вплив саме розміру об'єкту детектування. І для таких мін вже можна отримати чітку радіолокаційну карту навіть для глибини 20 см.

Таким чином, аналіз радіолокаційних карт для найбільш розповсюджених видів вибухонебезпечних предметів показав, що проти транспортна міна ТМ-62 якісно детектується електромагнітним методом на достатньо великих глибинах (до 50 см) для всіх найбільш поширених видів ґрунтів. Детектування протипіхотних мін із малим вмістом металевих конструкційних елементів (ПМН-2, ПФМ-1) запропонованим електромагнітним методом має обмеження по глибині та якісний стійкий сигнал спостерігається на глибинах до 20 см. Але протипіхотні міни мають найбільшу руйнівну силу коли вони розташовані на поверхні землі або приховані лише рослинним покривом. Тому виходячи із специфіки застосування цих мін можна зробити висновок про низьку вірогідність їх розташування на глибинах більше 20 см. Враховуючи складність використання інших методів детектування таких мін із незначним вмістом металевих компонентів, ці показники суттєво перевищують аналогічні методи.

Додатково підвищити якість детектування дозволить розробка програмного забезпечення для обробки та фільтрації отриманих електромагнітних сигналів. Це дозволить відсікати хибні сигнали та підвищувати контрастність корисних сигналів. Основою для побудови такого програмного комплексу можуть слугувати математичні моделі розсіювання електромагнітного випромінювання, де враховані конструкційні особливості вибухонебезпечних предметів та характеристики ґрунтів. Саме на це доцільно спрямувати зусилля майбутніх досліджень

8. Висновки

1. Розроблено функціональну схему електромагнітного детектору вибухонебезпечних предметів на основі цифрового процесору Blackfin. Апаратна частина детектору включає випромінюючу та приймаючу антени, блок посилення сигналу, систему автоматичного регулювання посилення, цифро-аналоговий перетворювачі та блок таймінгів. Така функціональна схема дозволяє організовувати збір даних з повною швидкістю передавання даних 16 Мбіт/с^{-1} , оновлення синхроімпульсів для цифро-аналогових перетворювачів кожні 32 мкс і проводити паралельні загальні адміністративні завдання на процесорі.

2. На основі розробленого детектору проведено експериментальну перевірку адекватності розроблених у попередніх роботах теоретичних моделей. Результати експерименту повністю підтвердили вплив обводненості ґрунтів, розміру об'єкту детектування та конструкційних особливостей вибухонебезпечних предметів. Результати аналізу радіолокаційних карт електромагнітного детектування мін ПМН-2, ПФМ-1 та ТМ-62 продемонстрували практичну спроможність використання запропонованого методу для виявлення заглиблених мін. Достатня якість детекції для мін ТМ-62 забезпечується на глибинах до 50 см, а для ПМН-2, ПФМ-1 до 20 см. Ці по-

казники повністю відповідають специфіці використання проти транспортних та протипіхотних мін та показують більшу якість у порівнянні з аналогічними методами. Використання відповідних математичних моделей, методів часово-частотних характеристик, вейвлетів, нейронних мереж, нечітких множин, моделей гауссових сумішей при обробці отриманих результатів дозволить додатково підвищити роздільну здатність та якість отриманих результатів.

Література

1. Требін М. П., Іванов С. В., Мельник О. А., Разумова Г. В. Війна як виклик існуванню цивілізації. Деструктивні мегатенденції сучасності: від пандемії до війни: монографія. Аналіт. центр сучас. гуманітаристики. Харків : Право. 2025. С. 105–130. URL: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/35712>
2. Songtao Li. Study on Ground-Penetrating Radar (GPR) Application in Pavement Deep Distress Detection. *Chengchao Guo Journal of Transportation Technologies*. 2019. Vol. 9. № 2. P. 18. doi: 10.4236/jtts.2019.92015
3. Frank J. W. P., Anthony J. P., David W. A. GPR combined with a positioning system to detect anti-personnel landmines. 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). 2015. P. 1–4. doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292660
4. Elsheakh D. M. Linear/circular polarizations slot antennas for millimeter wave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2017. Vol. 59(4). P. 976–983. doi: 10.1002/mop.30435
5. Indelicato A. The Impact of Frequency in Surveying Engineering Slopes Using Ground Penetrating Radar. *International Journal of Geosciences*. 2017. Vol. 8 № 3. P. 296–304. doi: 10.4236/ijg.2017.83014
6. Saranya S., Sudha G., Rithika B., Alagappan A., Sanjeev D. Ground Penetrating Radar For Identifying Mines In A Minefield. In 2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS) IEEE. 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780419
7. Abufares L., Chen Y., Al-Qadi I. L. Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 174. P. 106158. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106158
8. Liu Y., Zhang Z., Yuan Y., Zhu Y., Wang K. Quantitative Evaluation of Internal Pavement Distresses Based on 3D Ground Penetrating Radar. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. 2025. Vol. 20(1). P. 45–69. doi: 10.7250/bjrbe.2025-20.653
9. Cui L., Li L., Zhang W., Sun F., Fan D., Zhang H. Advances of deep learning application in qualitative and quantitative detection of road subsurface distress using ground penetrating radar: A review. *Measurement*. 2025. Vol. 247. P. 116760. doi: 10.1016/j.measurement.2025.117007
10. Wang W., Du W., Cheng S., Zhuo J. Numerical Simulation Study on the Impact of Blind Zones in Ground Penetrating Radar. *Sensors*. 2025. Vol. 25(4). P. 1252. doi: 10.3390/s25041252
11. Lambot S., Wu K., Sluÿters A., Vanderdonckt J. The Full-Wave Radar Equation for Wave Propagation in Multilayered Media and Its Applications. *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*. 2024. P. 123–160. doi: 10.1002/9781394284405.ch5
12. Sainson S., Sainson L., Sainson S. *Electromagnetic seabed logging*. Springer International Publishing. 2017. Vol. 19. P. 536. doi: 10.1007/978-3-319-45355-2
13. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of elec-
civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-3

tromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України. 2023. № 1(37). С. 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

14. Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій: Науковий журнал, Харків: НУЦЗ України. 2024. № 1(39). С. 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6

15. Карпов А. А., Кустов М. В., Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини. Проблеми надзвичайних ситуацій. Черкаси: НУЦЗ України. 2024. № 2(40). С. 57–71. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-5

A. Karpov, Adjunct

M. Kustov, DSc, Professor, Head of the Research Laboratory

R. Korniienko, PhD, Senior Researcher, Leading Researcher of the Department

O. Ivanenko, PhD, Head of the Department

D. Sharipova, PhD, Deputy Head of Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE ELECTROMAGNETIC METHOD OF DETECTING EXPLOSIVE OBJECTS

A detailed functional diagram of an electromagnetic explosive detector based on a high-performance digital processor of the Blackfin type has been developed. The hardware part of this detector includes a radiating antenna that generates electromagnetic waves and a receiving antenna that registers the reflected signal. It also includes a signal amplification unit, an automatic gain control system that ensures signal stability under changing environmental conditions, digital-to-analog and analog-to-digital converters for processing signals in digital form, and a timing unit that synchronizes all hardware components. This architecture allows for efficient data collection and processing at high transmission speeds and ensures prompt clock updates for the converters. On the basis of the developed prototype detector, a comprehensive experimental test was carried out to confirm the adequacy of the previously created theoretical models described in previous studies. The experiments showed that the electromagnetic properties of the environment, in particular the level of soil watering, as well as the geometric parameters of the explosive object and its design features, significantly affect the detection results. Analysis of radar images obtained during testing of the detector on samples of PMN-2, PFM-1 and TM-62 mines confirmed the effectiveness of the developed approach. In particular, the detector demonstrates the ability to detect a TM-62 mine at depths of up to 50 cm, and for anti-personnel mines (PMN-2 and PFM-1) the effective detection depth is up to 20 cm. These indicators fully meet the tactical requirements for detecting anti-personnel and anti-tank mines. To further improve the recognition accuracy and signal resolution, it is proposed to use modern mathematical models and methods of data flow processing.

Keywords: explosive ordnance, humanitarian demining, electromagnetic radiation, radar map

References

1. Trebin, M. P. Ivanov, S. V., Melnyk, O. A., Razumova, H. V. (2025). War as a challenge to the existence of civilization. Destructive megatrends of our time: from pandemic to war. *Viina yak vyklyk isnuvanniu tsyvilizatsii. Destruktyvni mehatendentsii suchasnosti: vid pandemii do viiny : monographe*; Kharkiv: Pravo, 105–130. Available at: <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/35712>

2. Songtao, Li. (2019). Study on Ground-Penetrating Radar (GPR) Application in Pavement Deep Distress Detection. *Chengchao Guo Journal of Transportation Technologies*, 9(2), 18. doi: 10.4236/jtts.2019.92015

3. Frank, J. W. P., Anthony, J. P., David, W. A. (2015). GPR combined with a positioning system to detect anti-personnel landmines. 8th International Workshop on Ad-

- vanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 1–4. doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292660
4. Elsheakh, D. M. (2017). Linear/circular polarizations slot antennas for millimeter wave applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 59(4), 976–983. doi: 10.1002/mop.30435
 5. Indelicato, A. (2017). The Impact of Frequency in Surveying Engineering Slopes Using Ground Penetrating Radar. *International Journal of Geosciences*, 8(3), 296–304. doi: 10.4236/ijg.2017.83014
 6. Saranya, S., Sudha, G., Rithika, B., Alagappan, A., Sanjeev, D. (2024). Ground Penetrating Radar For Identifying Mines In A Minefield. In 2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS) IEEE, 1–5. doi: 10.1109/ICPECTS62210.2024.10780419
 7. Abufares, L., Chen, Y., Al-Qadi, I. L. (2025). Asphalt concrete density monitoring during compaction using roller-mounted GPR. *Automation in Construction*, 174, 106158. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106158
 8. Liu, Y., Zhang, Z., Yuan, Y., Zhu, Y., Wang, K. (2025). Quantitative Evaluation of Internal Pavement Distresses Based on 3D Ground Penetrating Radar. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 20(1), 45–69. doi: 10.7250/bjrbe.2025-20.653
 9. Cui, L., Li, L., Zhang, W., Sun, F., Fan, D., Zhang, H. (2025). Advances of deep learning application in qualitative and quantitative detection of road subsurface distress using ground penetrating radar: A review. *Measurement*, 247, 116760. doi: 10.1016/j.measurement.2025.117007
 10. Wang, W., Du, W., Cheng, S., Zhuo, J. (2025). Numerical Simulation Study on the Impact of Blind Zones in Ground Penetrating Radar. *Sensors*, 25(4), 1252. doi: 10.3390/s25041252
 11. Lambot, S., Wu, K., Sluÿters, A., Vanderdonckt, J. (2024). The Full-Wave Radar Equation for Wave Propagation in Multilayered Media and Its Applications. *Ground Penetrating Radar: From Theoretical Endeavors to Computational Electromagnetics, Signal Processing, Antenna Design and Field Applications*, 123–160. doi: 10.1002/9781394284405.ch5
 12. Sainson, S., Sainson, L., Sainson, S. (2017). *Electromagnetic seabed logging*. Springer International Publishing, 19, 536. doi: 10.1007/978-3-319-45355-2
 13. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Харків: НУЦЗ України, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1
 14. Kustov, M. V., Kulakov, O. V., Karpov, A. A., Basmanov, O. YE., Mykhaylovs'ka, YU. V. (2024). Elektrodynamichna model' vzayemodiyi elektromahnitnoyi khvyli z poverkhneyu vybukhonebezpechnoyi rehovyny. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy: Naukovyy zhurnal*, Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny, 1 (39). 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6
 15. Karpov, A. A., Kustov, M. V., Kulakov, O. V., Basmanov, O. YE., Mykhaylovs'ka, YU. V. (2024). Vzayemodiya elektromahnitnoyi khvyli z poverkhneyu real'noyi vybu-khonebezpechnoyi rehovyny. *Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy*. Cherkasy: NUTSZ Ukrayiny, 2(40), 57–71. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-5

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 17.04.2025

УДК 621.3

В. О. Дурєєв, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)
С. М. Бондаренко, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)
О. А. Антошкін, к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID ID 0000-0003-2481-2030)
Ю. В. Михайловська, PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)
М. В. Маляров, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID ID 0000-0002-4052-7128)
М. М. Мурін, к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0002-9898-0128)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНОЇ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ВИКОНАВЧИМ ПРИСТРОЄМ АДАПТИВНОЇ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

Розроблено функціональну модель приладу широтно-імпульсної модуляції для перетворення безперервного нормованого вхідного аналогового сигналу в пропорційний вихідний сигнал широтно-імпульсної модуляції виконавчого пристрою системи протипожежного захисту. Виконано аналіз наукової літератури, що дозволило урахувати в математичних моделях застосування широтно-імпульсної модуляції керуючого сигналу для управління роботою інерційним виконавчим пристроєм, що не розглядалося раніше. Особливістю розробленої функціональної моделі є застосування широтно-імпульсної модуляції керуючого сигналу для управління роботою інерційним виконавчим пристроєм. Доведено, що для формування сигналу управління роботою виконавчого пристрою, модель приладу широтно-імпульсної модуляції управляючого сигналу повинна ураховувати тип, параметри роботи та конструктивні особливості виконавчого пристрою. Проведене дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий пристрій. Представлено залежності розкидів сигналу на виході виконавчого пристрою з заданою постійною часу від безрозмірного параметру, що представлено в логарифмічній системі координат. Визначено залежність розкиду та помилки сигналу на виході виконавчого пристрою з заданим значенням постійної часу від величини управляючого сигналу, частоти широтно-імпульсної модуляції та інерційності реального виконавчого пристрою. Запропоновано безрозмірний критерій для визначення параметрів широтно-імпульсної модуляції сигналу керування виконавчим пристроєм з заданою інерційністю та розкидом управляючого сигналу. Результати застосування функціональної моделі підтверджують вірність прийнятої гіпотези, а розраховані параметри роботи виконавчого пристрою відповідають експериментальним даним. Сформульовано рекомендації по визначенню параметрів безперервного управління виконавчим пристроєм.

Ключові слова: адаптивна система, постійна часу, виконавчий пристрій, широтно-імпульсна модуляція, скважність

1. Вступ

Сучасність формулює свої вимоги у будь-якій сфері людської діяльності. І автоматичні системи протипожежного захисту не є виключенням. Розробка нових систем по виявленню та гасінню пожеж на початковій стадії розвитку, вдосконалення вже існуючих є актуальною та важливою. Так системи протипожежного захисту дозволяють досягти скорочення часу виявлення, локалізації (як задачі-мінімум) та ліквідації пожежі. Однак в умовах воєнного часу, коли економіка нашої держави працює в умовах наднавантажень, оптимізація витрат на протипожежний захист за умови виконання системами своїх функцій та дотримання вимог чинного законодавства виходить на перший план. При тому, що застосування коштовних компонентів – домішок, піноутворювачів, сучасних газових вогнегасних речовин, нових та перспективних вогнегасних речовин призводить до збільшення вартості боротьби з пожежами або надзвичайними ситуаціями, особливо в умовах обмеженого запасу таких компонентів та складної логістики. Збільшення

зони пожежі тягне за собою спрацьовування додаткових сповіщувачів, зрошувачів, випускних насадків. Це тягне за собою необхідність перенастроювання роботи системи постачання вогнегасної речовини, збільшення витрат піноутворювача через систему дозування тощо. Підтримка мінімальної потрібної (нормативної) концентрації домішок або піноутворювача в рідких вогнегасних речовинах в умовах обмеженого запасу домішок, дозволить локалізувати і далі успішно ліквідувати пожежу до прибуття аварійно-рятувальних підрозділів ДСНС чи відомих формувань.

Для зменшення витрат і раціонального застосування коштовних компонентів, можуть бути використані виконавчі механізми з клапанами у своєму складі, які мають функцію роботи в імпульсному режимі. Алгоритм і режим їх спрацьовування визначається довжиною та потужністю імпульсу, який формується приладом перетворення від керуючого вхідного сигналу, характеристики якого залежать від інтенсивності розвитку пожежі.

Саме з наведених вище причин системи автоматичного протипожежного захисту все частіше застосовують в своїх робочих алгоритмах сучасні цифрові технології з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ) управляючих сигналів. Це стосується не тільки автоматичних систем пожежної сигналізації та оповіщення про пожежу і управління евакуацією, а й систем автоматичного пожежогасіння. Ще більшої актуальності набувають питання не тільки детермінованого вмикання систем автоматичних систем протипожежного захисту при виникненні пожежі, а саме управління окремими елементами систем безпеки з функцією самоналаштування в умовах випадкових змін інтенсивності розвитку пожежі.

Таким чином, зараз існує проблема розробки автоматичних систем пожежогасіння з функцією самоналаштування, які мають у своєму складі інерційні об'єкти з широтно-імпульсним управлінням.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В найбільш сучасних та перспективних системах протипожежного захисту застосовуються цифрові методи обробки інформації про стан надзвичайної ситуації. При цьому, в якості виконавчих пристроїв застосовуються сервісні прилади у вигляді відсічних клапанів та приводів, що працюють в імпульсному та безперервному режимах. При реалізації ШІМ сигналу на вході, застосовуються електронні схеми, що регулюють роботу таких виконавчих пристроїв.

Аналіз виміру рівня вихідного сигналу для виконавчого пристрою з заданою інерційністю в умовах швидкої зміни умов на вході в систему управління, представлено в [1]. Механізмом виконавчого пристрою в роботі виступав управляючий клапан, що керував роботою системою в умовах зміни рівня сигналу на вході, що характерно для ШІМ. Проте робота не передбачала аналіз та складання моделей блоку ШІМ для вхідного сигналу з параметрами виконавчого пристрою.

В роботі [2] розглянуто аналіз перехідних процесів виконавчого пристрою. Проведено аналіз параметрів роботи виконавчого пристрою. Визначені підходи контролю рівня стійкості роботи механізму в умовах зміни рівня вхідного сигналу. Варіантів реалізації блоків ШІМ в роботі не представлено, також не показано можливі структурні схеми блоків модуляції. Крім того, в роботі не розглянуті можливість адаптивної роботи приладів управління та їх вхідних параметрів від зміни параметрів роботи виконавчих приладів.

В [3] представлено реалізацію контролера регулювання потужності при зміні

сигналу рівня напруги. Запропоновано регулятор динаміки роботи в умовах зміни параметрів на вході регулятора. Відмічене, що в розробленій моделі регулятора потужності, параметри його роботи змінюються адаптивно до зміни вхідних параметрів, з умови забезпечення заданої ефективності та стабільності роботи підсилювача. Проте відмічена неможливість забезпечення зміни динаміки роботи підсилювача без зниження потрібного рівня потужності і точності при зміні вхідного сигналу.

В [4] представлено результати аналізу роботи перетворювача, що описується рівняннями п'ятого порядку, з урахуванням точності його вихідного сигналу. Запропоновано модель управління роботою модифікованого перетворювача з урахуванням зв'язку вихідних сигналів з сигналами на вході. Показано, що процес управління роботою перетворювача впливає та залежить від його конструкції. Проте в роботі не представлено моделі блоку ШІМ.

В [5] представлена система управління з застосуванням ШІМ синхронного перетворювача частоти коливань. Показано механізм моделювання частоти коливань в реальному часі для трьох режимів роботи перетворювача. Запропоновано метод застосування ШІМ на основі концепції застосування синхронного перетворювача з його структурою з урахуванням аналізу чутливості перетворювача. Показано переваги застосування ШІМ за рахунок покращення динаміки управління та запасу стійкості роботи. Проте застосування методу для інерційної моделі виконавчого пристрою в роботі не представлено.

В [6] розглядається модель автоматичного регулятора каскадного двоконтурного контролера струму та напруги з інтегрованою динамічною моделлю регулятора напруги. Показано, що в умовах урахування вихідного сигналу, такий перетворювач розглядається як синхронний при керуванні та емуляції його роботи. Наведені функціональні схеми регулятора та три моделі його роботи для демонстрації продуктивності його роботи. Проте структурно-функціональних схем, що демонструють ШІМ контролера не представлено.

В [7] представлено модель синтезатору вихідного сигналу в вигляді вихідної провідності. Регулятор має можливість контролювати декілька пов'язаних між собою вихідних сигналів з урахуванням вимог по точності роботи та заданих вхідних параметрах. Показано, що для реалізації такої можливості, синтезатор працює послідовно в різних режимах, що забезпечує контроль відповідного вихідного сигналу. Показано алгоритм застосування замкнутих полюсів для отримання зворотного зв'язку в довільних місцях для контролю режимів роботи виконавчого пристрою. Проте, можливості застосування адаптивного підходу для управління роботою виконавчого механізму не наведено.

В [8] представлена можливість застосування цифрового контролера виконавчого пристрою без додаткового застосування обладнання, що потребує додаткове живлення. Алгоритм роботи контролера базується на застосуванні ШІМ керуючих сигналів з контролем роботи проміжних перетворювачів. Наведено експериментальні результати визначення похибок роботи контролера, що відповідають рівню випадкової похибки при багатократних вимірах. Відмічене, що для роботи виконавчого механізму не потрібно додавання або заміни апаратного обладнання, що знижує вартість застосування наведеного підходу. Наведено алгоритм контролю стану системи широтно-імпульсного модулювання та його несправностей. Проте моделі та схеми блоку ШІМ не наведено, параметри виконавчого механізму не показано.

В [9] представлено підхід моделювання роботи регулятора роботи виконавчим механізмом на основі методу з'єднання компонентів, шляхом моделювання роботи складових регулятора. Наведено підхід до математичного моделювання складових виконавчого пристрою та регулятора його роботи з можливістю застосування ШІМ управляючих сигналів. Даний підхід застосовується для моделювання роботи регулятора та виконавчого механізму з розширеними каскадними контролерами та алгоритмами управління. Проте, алгоритм що дозволяє моделювати та скласти функціональну схему блоку ШІМ управляючих сигналів в роботі не наведено.

В [10] представлені математичні пакети, що дозволяють моделювати роботу виконавчих пристроїв. В якості пакетів застосовуються додатки VisSim, MatCad та Maple, Практична можливість застосування наведених програм можлива при наявності моделі виконавчого механізму та регулятора з блоком ШІМ. Крім того потрібна можливість модулювання зміни сигналів модуляції в залежності від рівня аналогового впливу, що видає блок широтно-імпульсної модуляції.

Аналіз літератури показав актуальність застосування виконавчих пристроїв в якості яких можуть виступати клапанні прилади системи дозування домішок до рідкої вогнегасної речовини. Такі механізми здатні працювати в режимі імпульсної дії, що забезпечується взаємодією цифрових пристроїв керування роботою виконавчих пристроїв в сучасних та перспективних системах протипожежного захисту. Проте, існує проблема урахування зміни факторів і параметрів пожежі на режими роботи протипожежного обладнання. На поточний час відсутні дослідження щодо впливу зміни аналогового сигналу, що характеризує стан та фазу розвитку пожежі на режими роботи виконавчих пристроїв перспективної адаптивної системи протипожежного захисту. Також не розглянуті алгоритми визначення параметрів широтно-імпульсної модуляції та їх вплив на конструкцію виконавчих пристроїв для забезпечення потрібних характеристик приладів системи протипожежного захисту.

Таким чином невирішеною та важливою частиною проблеми з підвищення ефективності роботи системи протипожежного захисту, є розробка моделі пристрою широтно-імпульсного модулювання спрацювання виконавчого пристрою з заданими статичними властивостями.

3. Мета та завдання дослідження

Метою представленої роботи є дослідження впливу параметрів широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на параметри управління виконавчим пристроєм адаптивної системи пожежогасіння.

Досягнення мети може бути реалізовано за умови розв'язання наступних завдань:

- розробити функціональну модель приладу широтно-імпульсної модуляції;
- провести дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий пристрій.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єкт дослідження – широтно-імпульсне модулювання керуючого сигналу виконавчого пристрою в адаптивній системі протипожежного захисту. Предмет дослідження – моделювання роботи пристрою широтно-імпульсної модуляції для дослідження роботи виконавчого пристрою. У якості гіпотези прийнято, що ви-

конавчий пристрій являє собою інерційну позиційну ланку першого порядку.

Структурно-динамічне моделювання широтно-імпульсного керуючого сигналу системи виконано із застосуванням математичного пакета прикладних програм, що дає можливість тестувати різні параметри без необхідності фізичного експерименту.

Дослідження впливу параметрів широтно-імпульсного модульованого сигналу на обраний вихідний сигнал інерційного об'єкта автоматичної системи пожежогасіння з реалізованою функцією адаптивності виконано на основі розгорнутих параметричних досліджень точності відтворення виконавчим механізмом керуючого сигналу.

Функціональна модель пристрою широтно-імпульсної модуляції розроблена з використанням програми VisSim [10]. Дослідження управляючого сигналу широтно-імпульсної модуляції та вихідного сигналу виконавчого пристрою проводилося з використанням програми Maple.

5. Розробка функціональної моделі приладу широтно-імпульсної модуляції

Функціональна модель приладу ШІМ, що перетворює вхідний аналоговий сигнал X в пропорційний вихідний Y , представлено на рис. 1.

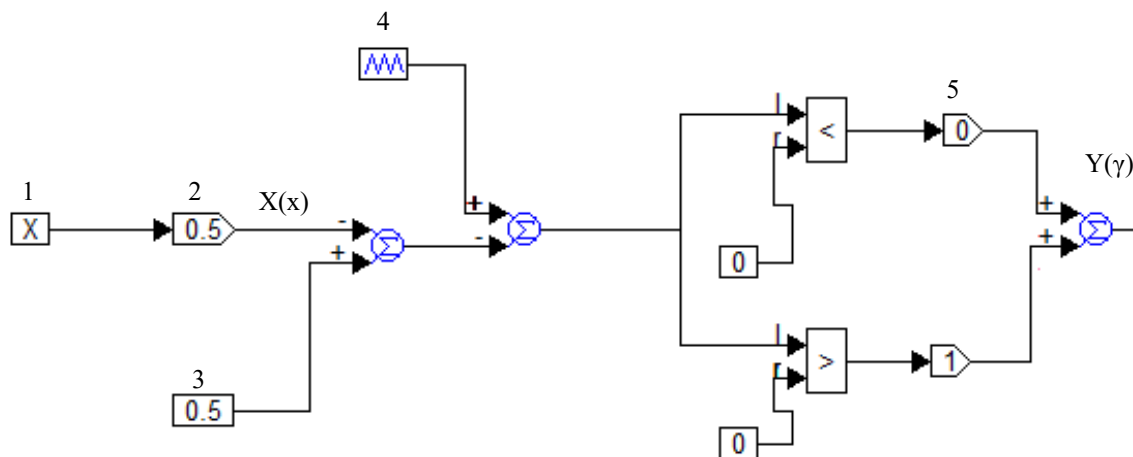
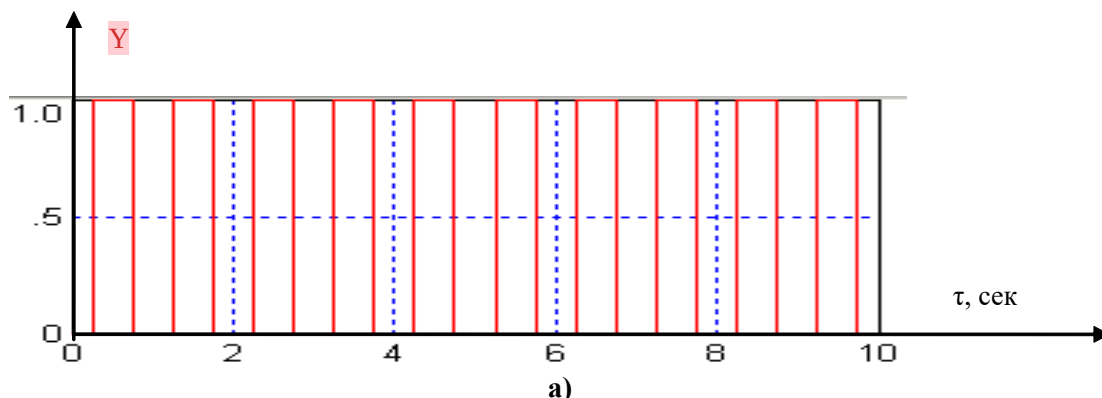
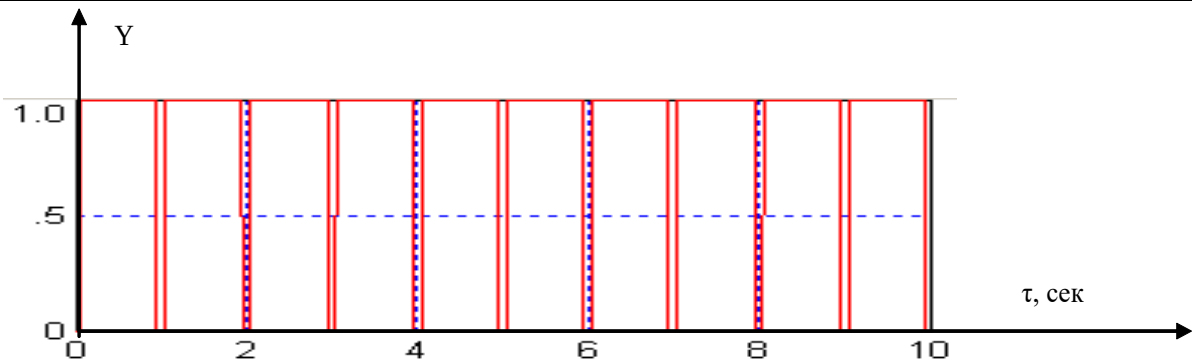


Рис. 1. Функціональна модель приладу ШІМ: 1 – вхідний сигнал X ; 2 – вхідний скорегований сигнал; 3 – сигнал скважності; 4 – сигнал пилоподібної форми; 5 – вихідний сигнал Y

На рис. 1 представлені графічні зображення роботи пристрою ШІМ вихідного сигналу Y для виконавчого пристрою ВМ-47, в залежності від рівня вхідного сигналу X та заданої скважності γ для двох режимів роботи.





б)

Рис. 2. Вихідний сигнал Y ШІМ: а – режим роботи 1; б – режим роботи 2

Залежність ШІМ вихідного сигналу наведена рис. 3.

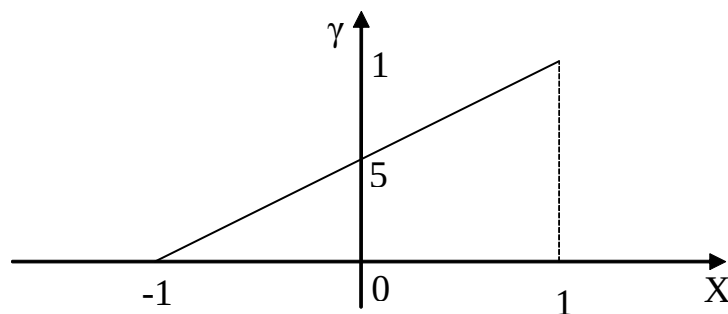


Рис. 3. Вихідний сигнал

Перший режим роботи ШІМ – рівень вхідного сигналу $X=0$, скважність $\gamma=0,5$. Другий режим – рівень вхідного сигналу $X=0,8$, скважність $\gamma=0,8$. Частота сигналу пілкоподібної форми в обох режимах роботи $\omega=1$.

6. Дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий пристрій

При впливі ШІМ на вхідний сигнал виникають коливання вихідного сигналу, що відповідає умовам, коли регульований параметр приймає стале значення.

Для зручності досліджень, введемо відносне значення сигналу на виході виконавчого пристрою в умовах, коли регульований параметр приймає стале значення. Розкид параметрів вихідного сигналу має вигляд

$$\bar{\sigma} = \left| \bar{y}_{\max} - \bar{y}_{\min} \right|. \quad (1)$$

Для вибору параметрів регулювання виконавчим пристроєм системи протипожежного захисту з заданими значеннями статичної та динамічної точності, потрібна інформація про конструктивні особливості виконавчого пристрою та його механізми. Ця інформація дозволяє визначити розкид вихідного сигналу виконавчого пристрою та його залежність від параметрів роботи складових системи протипожежного захисту.

Для дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий механізм, виконаємо дослідження за параметрами статичних характеристик інерційного виконавчого пристрою з двосторонньою дією з

проведенням ШІМ керуючого сигналу.

Згідно з гіпотезою, передаточна функція виконавчого пристрою:

$$W(p) = \frac{K_{ВП}}{T_{ВП}p + 1}, \quad (2)$$

де $K_{ВП}$ – коефіцієнт посилення; $T_{ВП}$ – інерційність пристрою, с.

Функціональна модель приладу ШІМ з урахуванням (2), та відносними вхідним $\bar{x}$ та вихідним $\bar{y}$ сигналами має наступний вигляд (рис. 4).

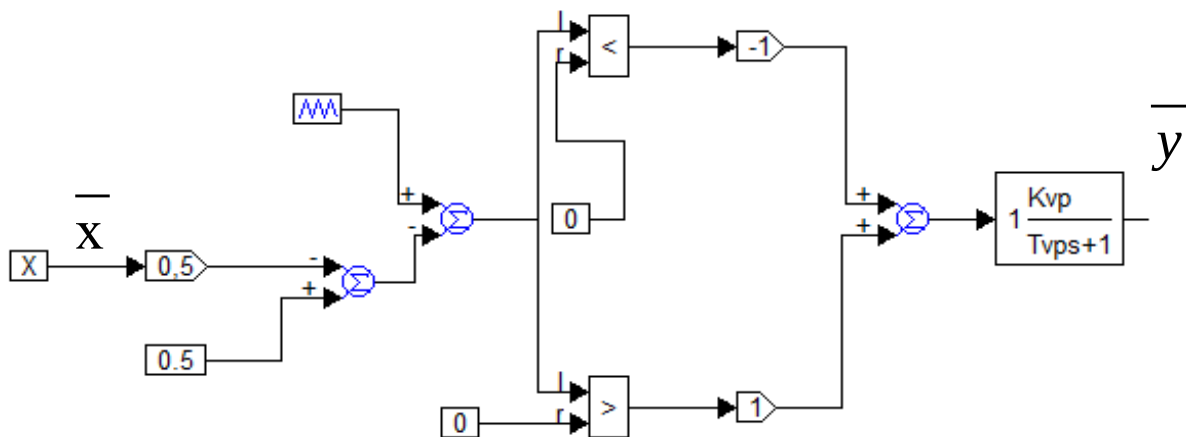


Рис. 4. Функціональна модель приладу ШІМ з виконавчим пристроєм

Графічні результати досліджень вихідного сигналу $\bar{y}$ від параметрів ШІМ та виконавчого пристрою, показано на рис. 5. Параметри ШІМ: $\bar{x} = 0$; $f = 1$, Гц, Виконавчий пристрій: $K_{ВП}=1$; $T_{ВП}=1$, с.

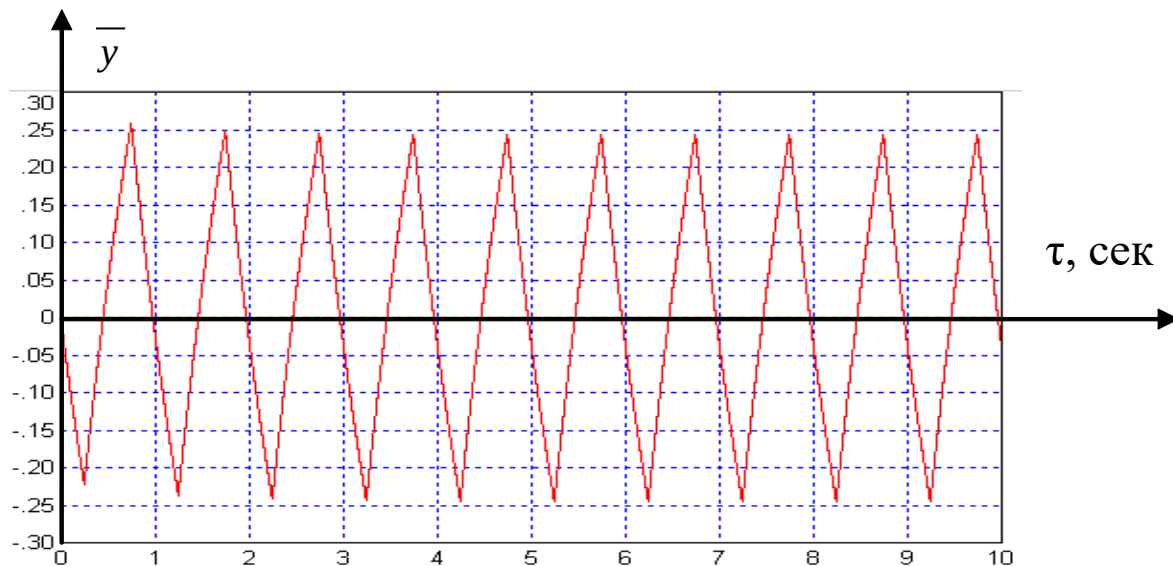


Рис. 5. Вихідний сигнал $\bar{y}$

Графічні результати дослідження впливу сигналу $\bar{x}$ керування на розкид параметрів вихідного сигналу $\bar{\sigma}$ показано на рис. 6.

Графічні результати дослідження впливу інерційності T та частоти f вхідного сигналу на розкид $\bar{\sigma}$ вихідного сигналу, показано на рис. 7.

7. Обговорення результатів дослідження впливу параметрів управляючого сигналу

Розроблено функціональну модель приладу ШІМ. Особливістю розробленої функціональної моделі є застосування ШІМ керуючого сигналу для управління роботою інерційним виконавчим пристроєм, що не розглядалося раніше. У порівнянні з існуючими моделями, розроблена функціональна модель урахує 12 факторів: аналоговий вхідний сигнал X , скорегований вхідний сигнал $X(x)$, частоту пилоподібного сигналу ω , скважність γ , частоту сигналу ШІМ f , вихідний сигнал ШІМ $Y(\gamma)$, мінімальне, максимальне та нормоване значення сигналу на виході виконавчого пристрою $Y_{\min}$, $Y_{\max}$, Y , розкид сигналу на виході виконавчого пристрою σ , коефіцієнт посилення виконавчого пристрою $K_{\text{ВП}}$, інерційність виконавчого пристрою $T_{\text{ВП}}$. Це дозволило визначити, що сигнал ШІМ з заданою частотою провокує коливання сигналу на вході виконавчого пристрою, коли величина обраного регульованого параметру приймає сталі значення. Розкид сигналу на виході виконавчого пристрою має пропорційну залежність від рівня сигналу на вході. Визначено, що при нульовому вхідному сигналі значення розкиду сигналу на виході приймає максимальну величину. При цьому максимальний рівень вхідного сигналу сприяє мінімальному розкиду сигналу на виході виконавчого пристрою.

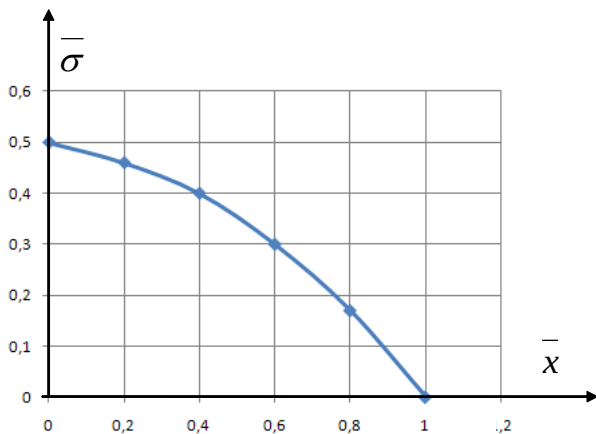


Рис. 6. Зміна вихідного сигналу

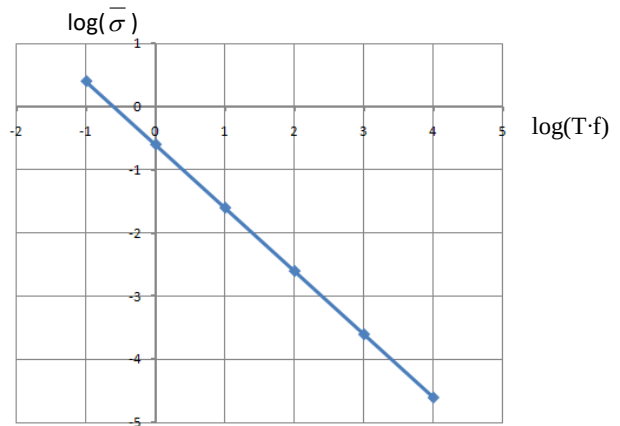


Рис. 7. Розкид вихідного сигналу

Проведене дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий пристрій. Особливістю проведених досліджень є представлення залежностей розкидів сигналу на виході виконавчого пристрою з заданою постійною часу від безрозмірного параметру, що представлено в логарифмічній системі координат. У порівнянні з існуючими дослідженнями виявлено, що величина розкиду значень вихідного сигналу $\bar{\sigma}$ в значному ступені визначається співвідношенням частоти f ШІМ управляючого сигналу та інерційності виконавчого пристрою. Визначено, що розкид $\bar{\sigma}$ залежить від значення безрозмірного критерію $f \cdot T_{\text{ВП}}$. Забезпечення заданої величини розкиду вихідного сигналу виконавчого пристрою забезпечується зменшенням частоти ШІМ управляючого сигналу, який в свою чергу зменшує постійну часу виконавчого пристрою.

Обмеженням застосування функціональної моделі приладу ШІМ є можливість її застосування виключно при відомих значеннях параметрів роботи усіх елементів системи протипожежного захисту. Типи застосованих в системі пристроїв та механізмів ураховуються в функціональній моделі ШІМ управляючого

сигналу параметрами постійної часу та коефіцієнту посилення.

Недоліком наведеної функціональної моделі є неможливість урахування зміни рівня вхідного сигналу та порядку скважності за межами прийнятих робочих діапазонів адаптивної системи протипожежного захисту, що відповідає широкій зміні режимів та стану протікання надзвичайної ситуації.

Подальший розвиток представленого методу функціонального моделювання роботи адаптивної системи протипожежного захисту полягає в урахуванні широкого діапазону режимів роботи системи, що відповідає зміні умов, режимів та рівня протікання надзвичайної ситуації. Урахування в моделі вказаних параметрів дозволить більш точно розрахувати управляючий сигнал ШІМ до виконавчого пристрою при зміні режиму та стану протікання надзвичайної ситуації. Проте це значно ускладнює функціональну модель системи управління за рахунок визначення параметрів спрацювання усіх складових системи протипожежного захисту, що само по собі являє окрему проблему. Напроти, більш загальний підхід дає можливість спростити дослідження роботи виконавчого пристрою.

Таким чином, результати застосування функціональної моделі ШІМ управляючого сигналу підтверджують вірність прийнятої гіпотези, а розраховані параметри роботи виконавчого пристрою відповідають експериментальним даним. Результати досліджень дозволяють зробити рекомендації по підборі динамічних параметрів, що покращить параметри спрацьовування перспективних сповіщувачів: статичну та динамічну температури спрацьовування, час спрацьовування.

Отже, отримані результати моделювання роботи СП підтверджують правильність обраної гіпотези, а визначені параметри роботи СП співпадають з даними експерименту. Таким чином, мету роботи досягнуто. Результати проведених досліджень дозволяють надати рекомендації по вибору параметрів роботи виконавчого пристрою та частоти управляючого сигналу ШІМ.

8. Висновки

1. Розроблено функціональну модель приладу широтно-імпульсної модуляції для перетворення безперервного нормованого вхідного аналогового сигналу в пропорційний вихідний сигнал широтно-імпульсної модуляції виконавчого пристрою системи протипожежного захисту. Особливістю розробленої функціональної моделі є застосування широтно-імпульсно модульованого керуючого сигналу для управління роботою інерційним виконавчим пристроєм. Доведено, що для формування сигналу управління роботою виконавчого пристрою, модель приладу широтно-імпульсної модуляції управляючого сигналу повинна ураховувати тип, параметри роботи та конструктивні особливості виконавчого пристрою. Так функціональна модель приладу широтно-імпульсної модуляції ураховує 12 факторів: аналоговий вхідний сигнал, скорегований вхідний сигнал, частоту пилоподібного сигналу, скважність, частоту сигналу, вихідний сигнал, мінімальне, максимальне та нормоване значення сигналу на виході виконавчого пристрою, розкид сигналу на виході виконавчого пристрою, коефіцієнт посилення виконавчого пристрою, інерційність виконавчого пристрою.

2. Проведене дослідження впливу широтно-імпульсно модульованого управляючого сигналу на виконавчий пристрій. Представлено залежності розкидів сигналу на виході виконавчого пристрою з заданою постійною часу від безрозмірного параметру, що представлено в логарифмічній системі координат. Визначено залежність розкиду та помилки сигналу на виході виконавчого пристрою з зада-

ним значенням постійної часу від величини управляючого сигналу, частоти широтно-імпульсної модуляції та інерційності реального виконавчого пристрою. Запропоновано безрозмірний критерій для визначення параметрів широтно-імпульсної модуляції сигналу керування виконавчим пристроєм з заданою інерційністю та розкидом управляючого сигналу. Сформульовано рекомендації по визначенню параметрів широтно-імпульсної модуляції сигналу для безперервного управління виконавчим пристроєм на базі електромагнітного клапану ВМ-47, що покращує параметри роботи перспективної адаптивної системи протипожежного захисту. Доречне урахування в функціональній моделі діапазону режимів роботи системи, що відповідає зміні умов, режимів та рівня протікання надзвичайної ситуації.

Література

1. Passenbrunner T., Sassano M., Trogmann H., del Re L., Paulweber M., Schmidt M., Kokal H. Inverse torque control of hydrodynamic dynamometers for combustion engine test benches. Proceedings of the American Control Conference. 2011. P. 4598–4603. URL: https://www.researchgate.net/publication/224254112_Inverse_torque_control_of_hydrodynamic_dynamometers_for_combustion_engine_test_benches
2. Torabnia S., Banazadeh A. Development of a water brake dynamometer with regard to the modular product design methodology, Proceedings of the ASME 2014. 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. 2014. № 15. P. 20229–20232. doi:10.1115/ESDA2014-20232
3. Shao T., et al. A robust power regulation controller to enhance dynamic performance of voltage source converters, In IEEE Transactions on Power Electronics. 2019. Vol. 34. P. 12407–12422. Dec. doi: 10.1109/TPEL.2019.2906057
4. Kustanovich Z., Reissner F., Shivratri S., Weiss G. The sensitivity of grid-connected synchronverters with respect to measurement errors. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 118985–118995. doi:10.1109/ACCESS.2021.3107345
5. Aouini R., Marinescu B., Ben Kilani K., Elleuch M. Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission. IEEE Trans. PowerSystems. 2016. Vol. 31. P. 278–286. URL: https://www.researchgate.net/publication/322998600_Synchronverter-based_emulation_and_control_of_HVDC_transmission
6. Ashabani M., Jung J. Synchronous voltage controllers: Voltage-based emulation of synchronous machines for the integration of renewable energy sources. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 49497–49508. doi:10.1109/ACCESS.2020.2976892
7. Busada C. A., Jorge S. G., Solsona J. A. Output admittance synthesizer for synchronverters. In IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. doi:10.1109/TIE.2023.3277109
8. Abo-Khalil A. G., Al-Qawasmi A.-R., Eltamaly A. M., Yu B. G. Condition monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM power converters using OBL method. Sustainability. 2020. № 12. P. 719–726. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3719>
9. Mandrile F., Musumeci S., Carpaneto E., Bojoi R., Dragicevicand T., Blaabjerg F. State-space modeling techniques of emerging grid-connected converters. Energies. 2020. Vol. 13. doi:10.3390/en13184824
10. Забара С. Моделювання систем у середовищі MATLAB. Університет «Україна», 2015. 137 с. URL: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovischi-matlab.html>

V. Durieiev, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
S. Bondarenko, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
O. Antoshkin, Phd, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department
Yu. Mykhailovska, PhD, Senior Researcher of the Department
M. Maliarov, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
M. Murin, PhD, Lecturer of the Department
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

APPLICATION OF PULSE WIDTH MODULATION FOR CONTROLLING THE EXECUTIVE DEVICE OF THE ADAPTIVE FIRE PROTECTION SYSTEM

A functional model of the pulse-width modulation device was developed to convert a continuous normalized input analog signal into a proportional output signal of the pulse-width modulation executive device of the fire protection system. An analysis of the scientific literature was carried out, which made it possible to take into account in mathematical models the use of pulse-width modulation of the control signal for controlling the operation of an inertial executive device, which was not considered before. A feature of the developed functional model is the use of pulse-width modulation of the control signal to control the operation of the inertial actuator. It has been proved that for the formation of the control signal of the operation of the executive device, the model of the device of pulse width modulation of the control signal must take into account the type, parameters of operation and structural features of the executive device. The study of the impact of the pulse-width modulated control signal on the executive device was carried out. The dependence of the signal spread at the output of the executive device with a given time constant on the dimensionless parameter presented in the logarithmic coordinate system is presented. The dependence of the spread and error of the signal at the output of the executive device with a given value of the time constant on the value of the control signal, the frequency of pulse-width modulation and the inertia of the real executive device is determined. A dimensionless criterion is proposed for determining the parameters of the pulse-width modulation of the control signal of the executive device with the given inertia and spread of the control signal. The results of the application of the functional model confirm the validity of the accepted hypothesis, and the calculated operating parameters of the executive device correspond to the experimental data. Recommendations for determining the parameters of continuous control of the executive device have been formulated.

Keywords: adaptive system, time constant, executive device, pulse width modulation, duty cycle

References

1. Passenbrunner, T., Sassano, M., Trogmann, H., del Re L., Paulweber, M., Schmidt, M., Kokal, H. (2011). Inverse torque control of hydrodynamic dynamometers for combustion engine test benches. Proceedings of the American Control Conference, 4598 – 4603. Available at: https://www.researchgate.net/publication/224254112_Inverse_torque_control_of_hydrodynamic_dynamometers_for_combustion_engine_test_benches
2. Torabnia, S., Banazadeh, A. (2014). Development of a water brake dynamometer with regard to the modular product design methodology, Proceedings of the ASME 2014. 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 15, 20229–20232. doi:10.1115/ESDA2014-20232
3. Shao, T., et al. (2019). A robust power regulation controller to enhance dynamic performance of voltage source converters, In IEEE Transactions on Power Electronics, 34, 12407–12422. Dec. 2019. doi: 10.1109/TPEL.2019.2906057
4. Kustanovich, Z., Reissner, F., Shivratri, S., Weiss, G. (2021). The sensitivity of grid-connected synchronverters with respect to measurement errors. IEEE Access, 9, 118985–118995. doi:10.1109/ACCESS.2021.3107345
5. Aouini, R., Marinescu, B., Ben, Kilani, K., Elleuch, M. (2016). Synchronverter-based emulation and control of HVDC transmission. IEEE Trans. PowerSystems, 31, 278–286. Available at: https://www.researchgate.net/publication/322998600_

Synchronverter-based_emulation_and_control_of_HVDC_transmission

6. Ashabani, M., Jung, J. (2020). Synchronous voltage controllers: Voltage-based emulation of synchronous machines for the integration of renewable energy sources. *IEEE Access*, 8, 49497–49508. doi:10.1109/ACCESS.2020.2976892

7. Busada, C. A., Jorge, S. G., Solsona, J. A. (2021). Output admittance synthesizer for synchronverters. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. doi:10.1109/TIE.2023.3277109

8. Abo-Khalil, A. G., Al-Qawasmi, A.-R., Eltamaly, A. M., Yu, B. G. (2020). Condition monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in PWM power converters using OBL method. *Sustainability*, 12, 719–726. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/9/3719>

9. Mandrile, F., Musumeci, S., Carpaneto, E., Bojoi, R., Dragicevic, T., Blaabjerg, F. (2020). State-space modeling techniques of emerging grid-connected converters. *Energies*, 13. doi:10.3390/en13184824

10. Zabara, S. (2015). Modelyuvannya sistem u seredovishchi MATLAB. *Universitet Ukraïna*, 137. Available at: <https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovischi-matlab.html>

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025

Y. Kalchenko, PhD, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0002-3482-0782)

*K. Afanasenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department
(ORCID 0000-0003-1877-1551)*

V. Oliinyk, PhD, Associate Professor, Head of the Department (ORCID 0000-0002-5193-1775)

O. Borsuk, PhD, Lecturer of the Department (ORCID 0000-0001-5759-4506)

*O. Kostyrka, PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-3225-6604)
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

DETERMINATION OF VARIOUS TYPES ELECTRIC LAMPS PARAMETERS IN EMERGENCY MODES OF OPERATION

Studies have been conducted to determine the temperature of electric lamps of various types in emergency modes of operation of power grids, namely overvoltage. Graphs of the dependence of the temperature of the bulb of incandescent lamps, arc mercury lamps and LED lamps on the voltage applied to them. Mathematical models of the value of the heating temperature of the bulb of the electric incandescent lamp, the arc mercury lamp and the LED lamp are obtained depending on the time. It is determined that the temperature of the bulb of the incandescent electric lamp increases exponentially and stabilizes after about 300 seconds. The temperature of an arc mercury lamp also varies exponentially, but, compared to an incandescent lamp, it is not so fast, but stabilizes after about 600 seconds. It is determined that in emergency modes of operation, the temperature of incandescent lamps and arc mercury lamps may exceed the normative values of temperature groups, as a result of which, when used in environments where explosive gases or vapors are present, they can become a source of ignition and lead to explosion or ignition of these substances. It is determined that the temperature of the LED lamp changes according to the linear law and after 300 seconds stops growing. Temperature dependencies of different elements of the LED lamp are built depending on the electric voltage applied to it. It was found that the driver, namely the power control chip, heats up most when the LED electric lamp is operating. It is determined that when the electric voltage decreases, the power control chip heats up more, but not significantly. It was found that the LED lamp is the best from the point of view of fire safety, since it has the lowest temperature, and also the change in the voltage of the electrical network reacts the least, which is explained by its design and principle of operation.

Keywords: lamp temperature, overvoltage, undervoltage, fire hazard

1. Introduction

In conditions of military aggression, accompanied by the destruction of the country's critical infrastructure and leading to frequent power outages, the risk of emergency modes of operation of electrical appliances, wiring and lighting systems increases. Unstable voltage, sudden de-energization and restoration of power supply can lead to overloads, short circuits, overheating of electrical network elements and failure of household and industrial equipment. Such phenomena threaten not only a decrease in energy efficiency, but also an increase in the risk of fires, electric shock, as well as prolonged interruptions in the operation of critical infrastructure. The study of these emergency modes is necessary to develop protective solutions, improve consumer safety and ensure the stable functioning of electrical systems in emergency situations.

Emergency and unstable modes of operation of the energy system of Ukraine significantly increase the risk of fires in certain areas of electrical networks. According to the State Emergency Service of Ukraine, in the 10 months of 2024 [1] there were more than 9500 fires caused by emergency modes of power grids and devices.

These data make it necessary to study the dangerous parameters of emergency modes of operation of electrical systems, in order to improve the level of safety of functioning of electrical appliances, which is an integral element of ensuring proper living conditions for people.

Under the conditions of emergency modes of operation of electric networks, the relevance of the study of fire safety of electric lighting increases even more, since damaged or unstable operating electric networks can increase the risk of fires.

Thus, the occurrence of fires due to emergency modes of operation of electrical networks is an urgent problem.

2. Analysis of literature data and problem statement

In [2] highlights the problems of fire safety of electric networks and preventive measures for their safe operation of electric cables. Based on the analysis of the main fire characteristics (time to use, peak heat release rate and time to peak heat release rate), new types of nanometer fire retardant coating and the method of intermediate protective cable box are proposed. However, the study does not indicate parameters of emergency modes close to critical parameters.

The large length and probability of failure of insulation coatings of electrical conductors provide a large number of studies of the state of fire safety of electrical conductors. Thus, in works [3–6], fire resistance indices of different insulation and cross-sections of electrical conductors are established. In the work [3], the extremely low values of the parameters of the electrical conductors of the «БВГ» and «АВВГ» brands are set, in which, in the event of a short circuit in the network with a faulty protective device, their insulation can ignite, which can cause a fire. In the case of [4, 5], a copper conductor made of polyethylene insulation was investigated using conical calorimetry under overload conditions with the definition of: time to ignition (TTI), heat release rate (HRR), gas release and loss of mass PE wires. In [5, 6], copper conductors with polyethylene and polyvinyl chloride insulation (PVC) were tested for flame propagation. The obtained results indicate that the propagation by conductors of a larger flame diameter is wider, but its propagation speed is less and rises more slowly with current. The considered works provide information on the spread of fire through live wires under overload conditions, but do not consider other emergency modes.

In [7–10], studies are aimed at determining the fire hazard parameters of the connection of network contacts, characterized by large transitional supports and the release of a large amount of heat. In [7], the overheating conditions of the plug-socket connection are considered and an approach is proposed for fire protection of electrical networks by arranging an electric circuit opening element in the socket module. However, this method is effective for the case under consideration and was not investigated during the emergency operation of lighting devices. [8] presents studies of electrical connectors under the influence of current pulses when a short circuit occurs, which leads to softening of the conductor and instantaneous drop in contact resistance. The proposed technique for estimating the contact resistance drop, calculated using a transient electric-thermal model, is important for emergency operating modes, but it is only valid for impulse currents. The work [9] on the study of fire hazard parameters of contact connections of electrical conductors in conditions of overvoltage, overload, growth of transient resistances, which in the process causes strong heating, breakdown of insulation, sparking, appearance of an electric arc – gives a general significance and does not consider emergency modes for the lighting network. [10] discusses the fire safety problems of LED devices, including the flicker effect and other aspects that may affect the safety of operation, since they can lead to failure or fire. However, the given articles did not define the maximum permissible values of indicators of emergency modes of operation, and the obtained results of experiments were not included in the requirements of regulatory documents.

Given the analysis of sources, it was found that the study of emergency modes of operation of lighting networks was not sufficiently considered.

Since lighting devices have a wide range of applications in both industrial, residential and public buildings, and in unstable work can serve as causes of fire danger. That is why lighting networks require research in emergency modes with the proposal of safety measures.

Thus, an unsolved part of the problem under consideration is the study of the processes of occurrence of fire-hazardous parameters in lighting networks under emergency operating modes.

3. The purpose and tasks of the research

The purpose of the work is to determine the thermophysical characteristics of electric lamps of various types due to heating in the event of overvoltage or low voltage in the electrical network.

To achieve this goal, you need to solve the following problems:

- conduct experimental studies to determine the temperature of electric lamps of different types at different values of the electric voltage;
- build mathematical models of temperature dependencies of electric lamps of different types on voltage at overvoltage and in low voltage mode and check their adequacy.

4. Research materials and methods

The object of research is the thermal processes occurring in electric lamps in emergency modes of operation of electrical networks.

The subject of research are electric incandescent lamps, arc mercury lamps and LED lamps.

The hypothesis of the study was that under certain conditions, when an overvoltage occurs in the electrical network, the temperature of the electric lamp may increase, as a result of which it can become a source of ignition of certain materials and/or substances.

Measurements of the temperature of electric lamps were carried out on a laboratory stand, the appearance of which is given in Fig. 1.

Tabl. 1. Technical characteristics of laboratory autotransformer RUCELF LTC-300-16-D

Characteristic	Value
Load power, kVA/W	2.4
Rated input voltage, V	220
Output voltage control range, V	0–300
Mains frequency, Hz	50–60
Maximum load current, A	16
Protection Class	IP20

Three types of lamps were used for the study: a 100 W incandescent lamp, a 250 W mercury arc lamp and a 7 W LED lamp. Appearance of electric lamps used in the test is given in Fig. 2.



Fig. 1. Appearance of laboratory stand for fire hazard study of electric lamps

The laboratory stand consists of three main parts: a laboratory autotransformer, a stand for installing electric lamps and measuring instruments, and a laptop with software for processing results. The power supply of the stand comes from the laboratory autotransformer of the RUC ELF brand LTC-300-16-D the technical characteristics of which are given in Tabl. 1.

Control over the values of electric current parameters was carried out by digital meters of voltage, current and power of the PeaceFair PZEM-008 brand. Thermocouples connected to the bulb of each of the lamps were used to measure the temperature, as shown in Fig. 3.



Fig. 2. Appearance of electric lamps of different types used for tests: 1 – incandescent lamp; 2 – LED lamp; 3 – arc mercury lamp

The thermocouple is necessary for measuring the temperature of the bulb of an

electric lamp and transmitting its temperature values through a computing and measuring unit to a laptop, where the results were recorded using Thermopair software.



Fig. 3. Appearance of the thermocouple used to measure the temperature of the bulb of electric lamps

Additionally, to measure the temperature of the elements of the LED lamp, the WINTACT WT3160 thermal imager was used, the appearance of which is shown in Fig. 4, and its technical characteristics in Tabl. 2.



Fig. 4. Appearance of thermal imager WINTACT WT3160

Tabl. 2. Thermal imager characteristics WINTACT WT3160

Parameter, unit of measure	Value
Temperature measurement range, °C	-20–450
Display, inches	2,8 full-angle TFT
Temperature sensitivity, °C	0.07
Spectral range, μm	8–14
Measurement error, %	± 2 (or $\pm 2\%$ if more 300 °C $\pm 5\%$)
Operating temperature, °C	0–45
Storage temperature, °C	-20–60
Humidity, %	< 85

To achieve this goal, analytical approximation methods and application of mathematical software in the Maple and Excel environments were applied.

5. Experimental determination of the temperature of electric lamps at different voltage values

Studies to determine the temperature of electric lamps of different types were conducted for electric voltages of 195 V, 220 V and 245 V. In the first experiment, the temperature of the bulb of the incandescent electric lamp was measured. The total number of tests for each electric lamp at one given voltage value was 10 tests. Incandescent lamps were tested for 300 s, since when the tests continued for more than 300 s, their flask temperature did not change. Tabl. 3 shows the results of measurements of incandescent lamps temperature at different values of electric voltage applied to them.

Tabl. 3. Results of incandescent bulb temperature measurements at different voltage values

t,s	$\Delta T, ^\circ\text{C}$		
	U=195 V	U=220 V	U=245 V
0	20.0	20.0	20.0
60	96.5	99.1	103.0
120	133.1	144.2	151.5
180	144.1	152.2	164.2
240	148.3	154.2	167.7
300	149.2	155.6	168.3

Tabl. 4. Temperature measurement results of the arc mercury bulb at different voltage values

t,s	$\Delta T, ^\circ\text{C}$		
	U=195 V	U=220 V	U=245 V
0	29.0	29.0	29.0
60	35.6	35.2	34.5
120	45.3	60.5	64.1
180	80.3	120.6	137.2
240	126.3	169.7	183.2
300	155.5	188.5	212.5
360	167.7	195.6	227.2
420	174.4	199.1	232.1
480	181.3	205.1	232.6
540	183.1	207.8	233.7
600	184.9	209.4	234.3

Tests of arc mercury lamps were carried out for the same values of spectacular voltages as for incandescent lamps. Tabl. 4 shows the results of measuring the temperature of the arc mercury bulb at different voltages. The duration of the tests of arc mercury lamps was 600 s, since during this time it heats up to its working one, and the initial heating process is not as rapid as that of incandescent lamps.

The LED lamp is heated to the operating temperature in about 300 seconds, and

the temperature change of its bulb changes almost linearly. Tabl. 5 shows the results of measuring the temperature of the bulb LED lamp at different voltages. The bulb temperature of the LED lamp compared to other types of electric lamps also increases with increasing voltage, but slightly.

Tabl. 5. Results of measurements of LDS lamp bulb temperature at different values of electric voltage

t,s	$\Delta T, ^\circ\text{C}$		
	U=195 V	U=220 V	U=245 V
0	20.0	20.0	20.0
60	32.1	37.3	38.2
120	39.3	40.8	43.6
180	42.4	44.5	47.5
240	47.3	50.4	51.3
300	49.2	52.1	53.9

At the same time, during the research, it was found that the bulb of the LED lamp is not the hottest point of the LED lamp. As a result of this, additional studies were carried out to determine the temperature of the elements of the LED lamp when various electric voltages were applied to them.

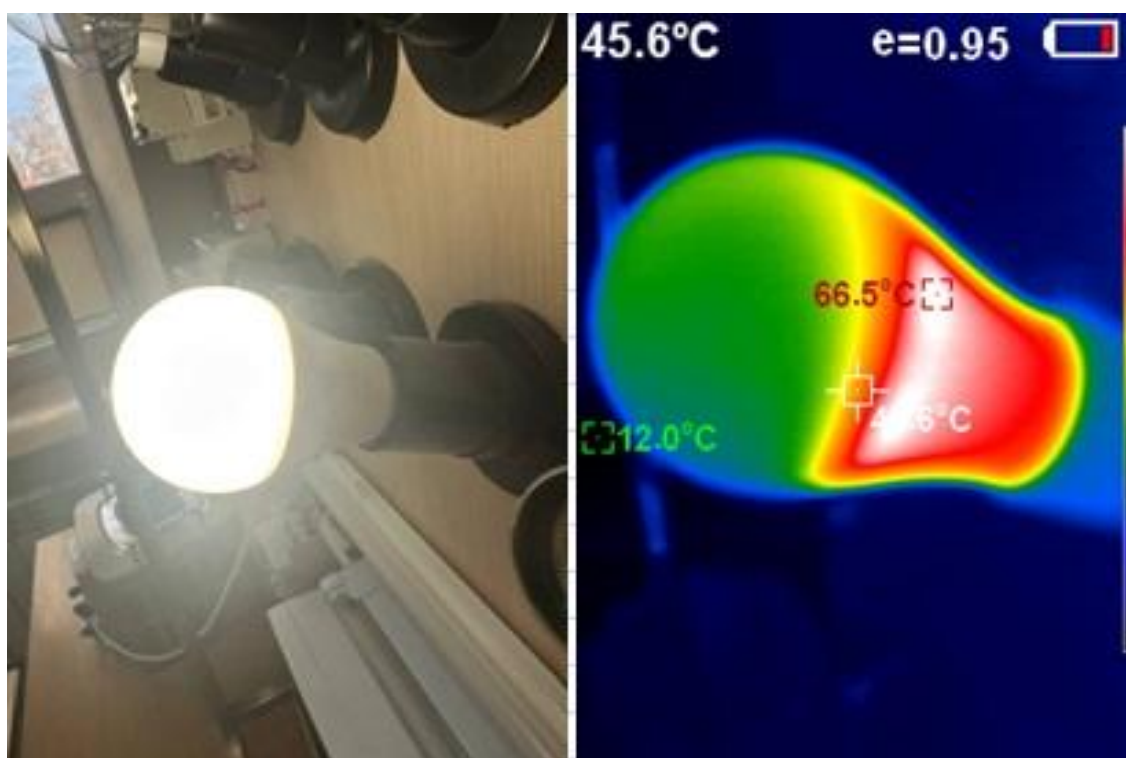


Fig. 5. Principle of heat distribution over the LED lamp body

As a result of experiments, it was determined that the hottest element of the LED lamp is not its bulb, but the body, as shown in Fig. 5. This is due to the fact that when the LED lamp is operating, its driver is most heated, namely the power control chip, which is installed in the lamp body.

Fig. 6 shows the temperature of the power control chip at different voltages, and Fig. 7 shows the temperature relationships of different elements of the LED lamp when they are supplied with an electric voltage of different values.

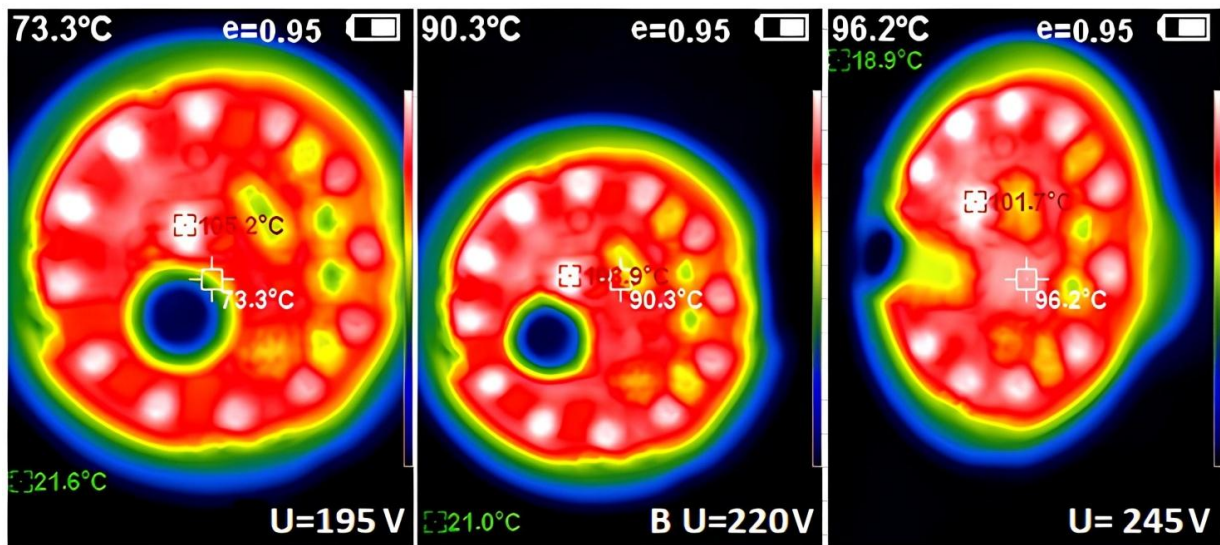


Fig. 6. LED lamp driver temperature at different voltages

From the analysis of Fig. 6. it can be seen that when the electric voltage decreases, the power control chip heats up more, but not significantly.



Fig. 7. Dependence of the temperature of the LED lamp elements on the supplied electric voltage.

Fig. 8 dependence of temperature of bulb of electric lamps of different types on electric voltage in stationary operation mode is presented. From the analysis of the graphs presented in Fig. 8, it can be argued that LED electric lamps are the safest lamps from the point of view of fire safety, since they have a lower heating temperature and work more stably under voltage drops.

6. Construction of mathematical models of dependence of temperature of electric lamps depending on voltage

The obtained data were approximated and mathematical models of temperature dependencies of incandescent bulbs, arc mercury lamps and LED lamps were obtained, which are presented in Tabl. 6. The adequacy of these mathematical models was checked and their maximum relative errors were determined, which are also given in Tabl. 6.

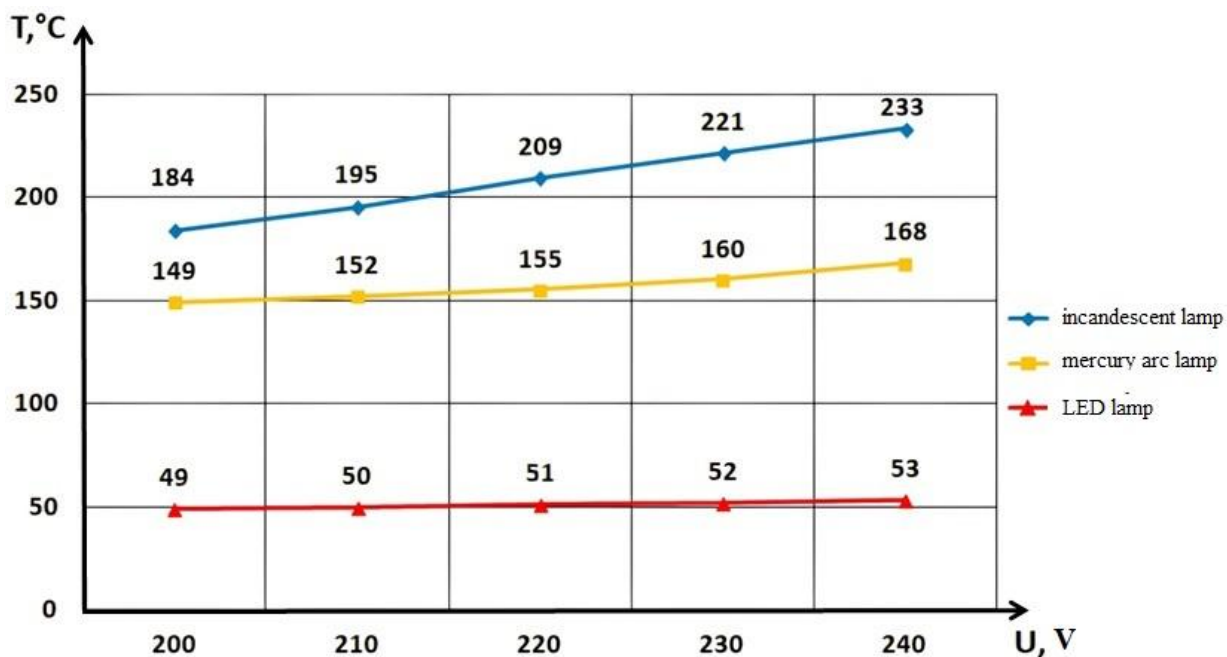


Fig. 8. Dependence of the heating temperature of the lamp bulb of different types on the electric voltage at steady operation mode

In this voltage range, the temperature dependence of an incandescent bulb on time is best described by polynomial models of the third degree, for arc mercury lamps by polynomial models of the fourth degree, and LED lamps by polynomial models of the second degree. Based on the measurement results, graphs of the heating temperature of the incandescent bulb and the arc mercury lamp versus time at different electrical voltages were plotted, which are shown in Fig. 9, Fig. 10, respectively.

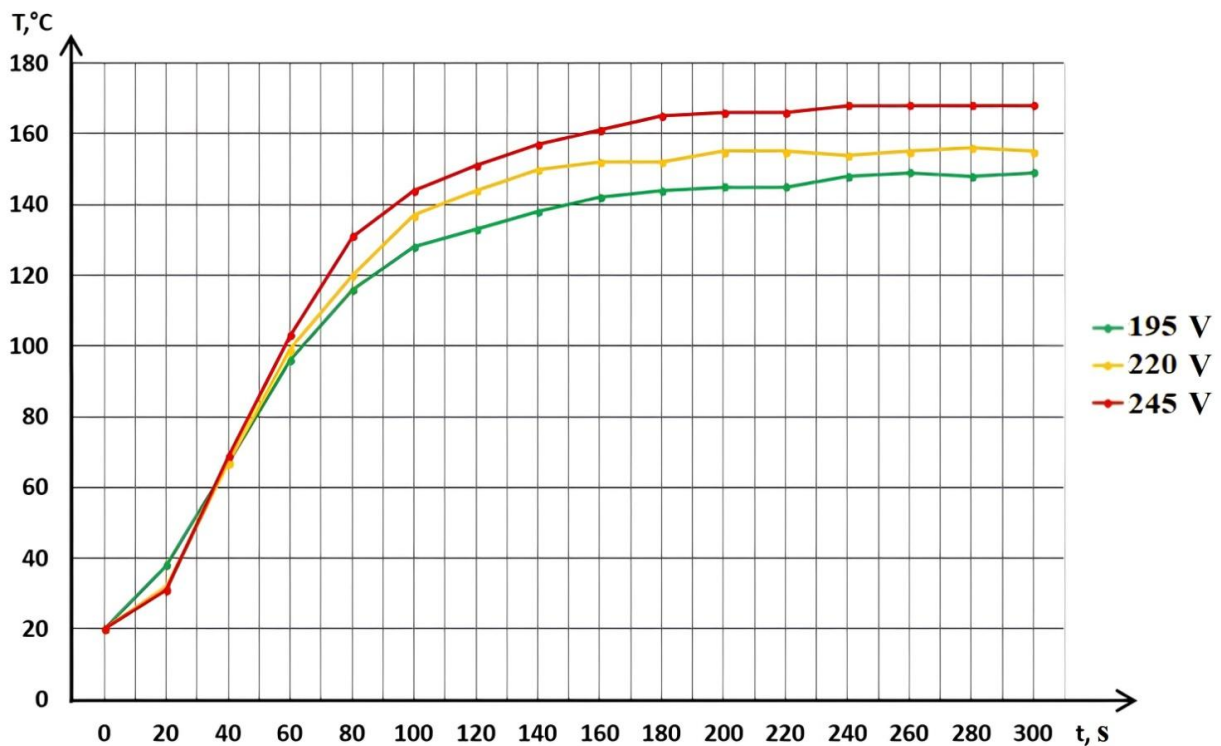
From the analysis of these graphs, it can be argued that the filament bulb temperature varies exponentially. From the first to the hundredth second it grows rapidly, from the hundredth to the two hundredth second it grows, but not so sharply, and after 200 s it almost does not change.

From the analysis of the graphs in Fig. 10, it can be argued that the dependence of the temperature of the bulb of arc mercury lamps on the applied voltage in the stationary mode of operation is almost linear.

Fig. 11 shows graphs of the LED bulb heating temperature versus time at different electrical voltages. It follows from the graphs that the temperature change of the flask is almost linear, and its difference when applying a voltage of 195 V and 245 V is only 4.7 °C. In this voltage range, the temperature dependence of the bulb of the LED lamp on time is best described by polynomial functions of the second degree, since the dependence is almost linear.

Tabl. 6. Mathematical models of the value of the heating temperature of the electric incandescent bulb depending on the time

Voltage values U, V	Mathematical model	Maximum relative error, %
Incandescent lamps		
195	$T(t) = 0,0965t^3 - 3,7532t^2 + 48,154t - 36,429$	4.02
220	$T(t) = 0,0945t^3 - 3,6364t^2 + 45,764t - 33,080$	1.93
245	$T(t) = 0,0914t^3 - 3,3933t^2 + 41,832t - 24,863$	5.35
Arc mercury lamps		
195	$T(t) = 0,0029t^4 - 0,1941t^3 + 3,9079t^2 - 13,626t + 37,740$	3.22
220	$T(t) = 0,0028t^4 - 0,1901t^3 + 4,0222t^2 - 18,897t + 50,338$	3.46
245	$T(t) = 0,0018t^4 - 0,1318t^3 + 2,9315t^2 - 14,280t + 47,545$	2.13
LED Lamps		
195	$T(t) = -0,1418t^2 + 4,1813t + 20,968$	3.74
220	$T(t) = -0,1012t^2 + 3,4320t + 21,789$	4.35
245	$T(t) = -0,0758t^2 + 2,8960t + 21,534$	4.02

**Fig. 9. Dependence of incandescent bulb heating temperature on time at different electric voltages**

7. Discussion of the results of determining the temperature of electric lamps at overvoltage

As a result of the study, the temperature of electric lamps of various types was obtained from the supplied electric voltage, in the range from 195 V to 245 V, and mathematical models of these dependencies were obtained.

From the analysis of the graphs in Fig.5, it can be argued that the temperature of the bulb of the incandescent lamp increases with the voltage applied to it. At a voltage of 220 V, the temperature of the flask was 155.6 °C and at a voltage of 245 V – 168.3 °C, which is 8.1% more than the standard operating mode. At the same time, reducing the applied voltage to 195 V reduced the temperature of the bulb of the incandescent electric lamp by only 4.2%. From the experiments conducted, it can be argued that the dependence of temperature on the applied voltage for electric incandescent lamps is not linear.

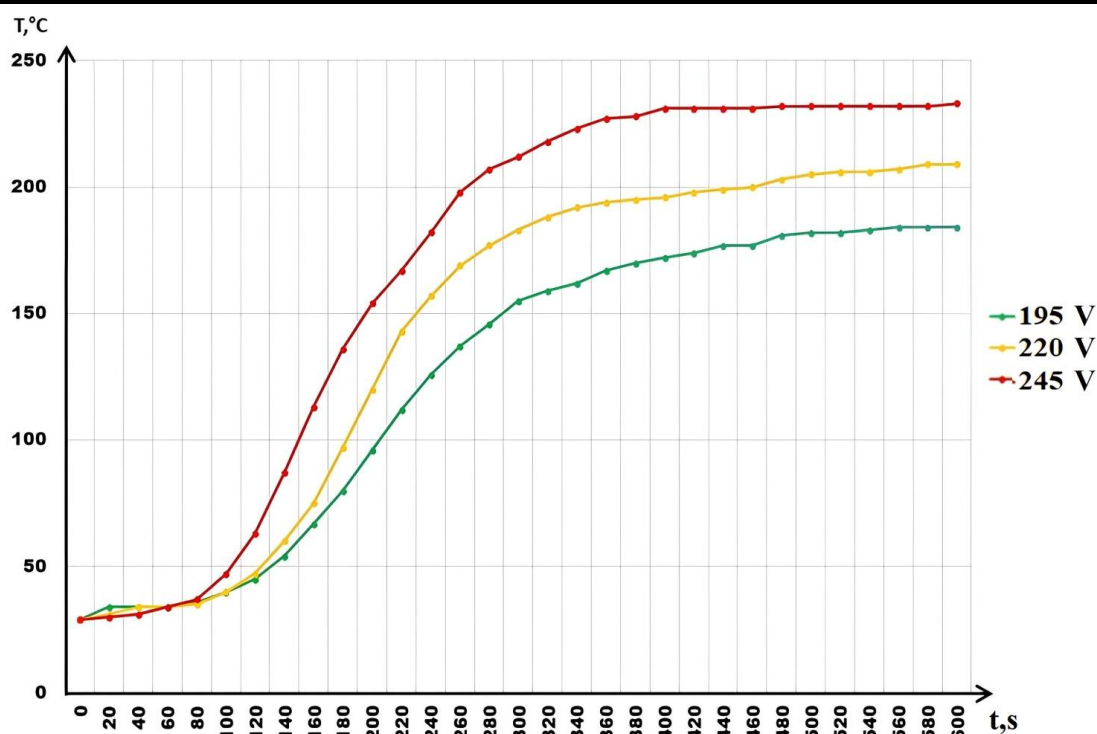


Fig. 10. Arc mercury bulb heating temperature vs time at different electrical voltages

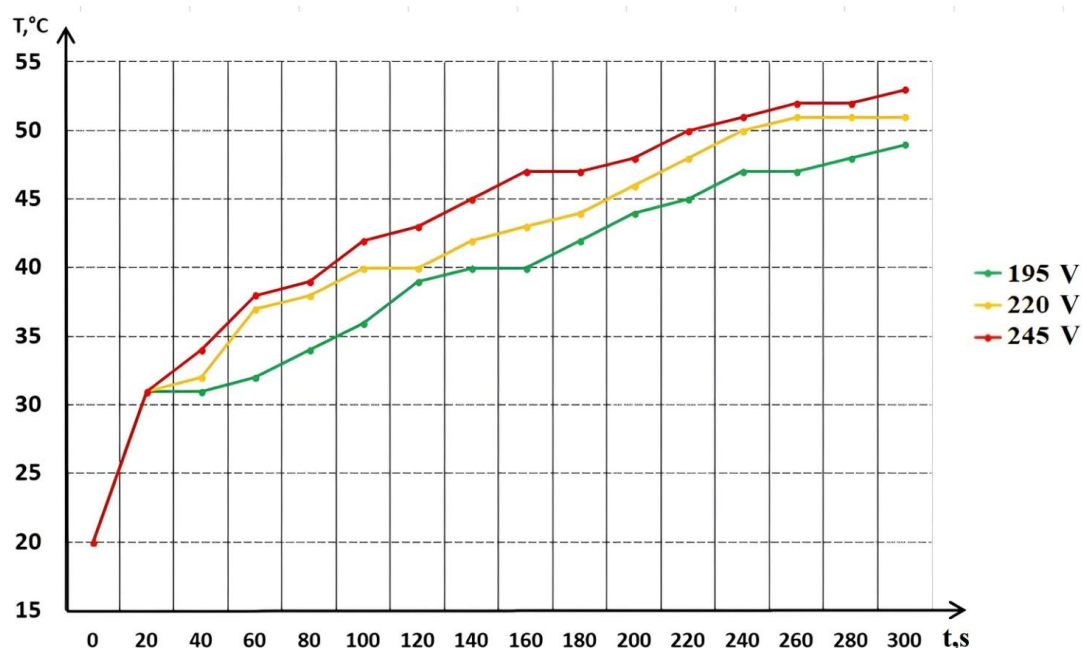


Fig. 11. Dependence of LED lamp bulb heating temperature on time at different electric voltage

The dependency analysis in Figure 6 shows that the temperature of the arc mercury bulb also increases with the voltage applied to it. At a voltage of 220 V, the temperature of the bulb was 209.4 °C and at a voltage of 245 V – 234.3 °C, which is 11.8 % more than the standard operating mode, and a decrease in the applied voltage to 195 V reduced the temperature of the bulb of the incandescent lamp by 13.2 %.

Based on this, it can be argued that in emergency modes of operation, the temperature of incandescent lamps and arc mercury lamps may exceed the normative values of temperature groups, as a result of which, when used in environments where explosive gases or vapors are present, they can become a source of ignition and lead to explosion or ignition of these substances.

The temperature of the bulb of the LED lamp also increases with increasing voltage, but slightly, as can be seen from the graphs in Fig. 7. At a voltage of 220 V, the temperature of the flask was 52.1 °C and at a voltage of 245 V – 53.9 °C, which is 3.4 % more than the standard operating mode, and reducing the applied voltage to 195 V reduced the temperature of the LED bulb by 5.8 %.

It was found that the driver, namely the power control chip, heats up most when the LED electric lamp is operating. From the analysis of Fig. 10. it can be seen that when the electric voltage decreases, the power control chip heats up more, but not significantly. At 195 V, its temperature is 105.2 °C, at 220 V – 103.9 °C, and at 245 V – 101.7 °C. At the same time, the temperature of its body also drops by about 1 °C with an increase in voltage by 25 V. And the temperature of the flask, on the contrary, increases by 2 °C with an increase in voltage by 25 V. This may be due to the fact that the temperature of the flask depends not only on the heating temperature of the power control chip, but also on the temperature of the LEDs, inductor and capacitor, but for the reliability of this hypothesis, additional research is necessary.

Based on this, it can be argued that the LED lamp is the best from the point of view of fire safety, since it has the lowest temperature, as well as the least responsive change in the voltage of the electrical network, which is explained by its design and principle of operation.

The disadvantages of the studies are that mathematical models for predicting the temperature of electric lamps of different types can be applied only to electric lamps of the corresponding capacities, although the tendency to change their temperature under emergency operating modes will be the same for all lamps of this type.

With regard to LED lamps, the question remains open regarding their reliability and durability of operation in emergency modes of operation, which requires additional research.

8. Conclusions

1. Experimental studies were conducted to determine the temperature of electric lamps of different types at different values of the electric voltage. It was determined that the highest heating temperature of the bulb is observed in arc mercury lamps – 234.3 °C, which is 24.9 °C more than its temperature under standard operating conditions. The 100 W incandescent bulbs warmed up to 168.3 °C, which is 12.7 °C more than its temperature in standard operation, and the LEDs only up to 53.9 °C, which is only 1.8 °C more than the temperature in standard operation. LED lamps at work have a significantly lower temperature, which makes them safer to use in different conditions.

2. Mathematical models of dependence of temperature of electric incandescent lamps, arc mercury lamps and LED lamps on voltage at overvoltage and in low voltage mode are constructed and their adequacy is checked. The maximum relative errors of the obtained mathematical models were determined. For mathematical models of electric incandescent lamps, the maximum relative error is 5.35 %, for arc mercury lamps – 3.46 %, and for LED lamps – 4.35 %.

References

1. Analytical report on fires and their consequences in Ukraine for 10 months of 2024. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/6/analitchna-dovidka-pro-pojeji-102024-ost.pdf>
2. Lyn, A., Kravets, I., Ferents, N., Peleshko, M. (2023). Factors of the fire hazard of cable products. *Fire Safety*, 42, 56–64. doi: 10.32447/20786662.42.2023.07

3. Kalchenko, Y., Afanasenko, K., Lypovyi, V., Pikalov, M. (2023). Determination of Parameters of Electrical Conductors under Emergency Operating Conditions. Problems of Emergency Situations, 37, 305–316. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-22

4. Deng, J., Lin, Q., Li, Y., Wang, C., Wang, H., Man, P. (2023). Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148, 11695–11705. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12522-5>

5. Zhang, Y., Tang, K., Liu, Z., Chen, Y. (2021). Experimental study on thermal and fire behaviors of energized PE-insulated wires under overload currents. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 145, 345–351. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-020-09745-1?fromPaywallRec=true>

6. Deng, J., Lin, Q.-W., Li, Y., Wang, H.-B., Wang, C.-P., Zhao, Y.-H., Lyu, H.-F., Shu, C.-M. (2023). Ignition and Flame Spreading Features of Excessively Overloaded Polyvinyl Chloride Copper Wires. Fire Technology, 59, 3589–3607. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-023-01482-9?fromPaywallRec=true>

7. Zobenko, O. (2023). Model of Fire Protection of Electrical Networks at the Places of Contact Connections. Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(15), 141–148. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15).141-148

8. Israel, T., Schlegel, S., Großmann, S., Kufner, T., Freudiger, G. (2019). Modeling of Transient Heating and Softening Behaviour of Contact Points During Current Pulses and Short Circuits. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. doi: 10.1109/holm.2019.8923941

9. Nazarovets, O., Pererva, R., Rudyk, Y., Kyrychenko, O., Yankiv, V. (2024). Experimental study of fire hazard parameters of contact connections in electrical wiring. Social Development and Security, 14(2), 161–178. doi: 10.33445/sds.2024.14.2.15

10. Hychpan, V., Petrovskyy, V., Rudyk, U. (2016). Standardization of testing characteristics of LED modules. Fire Safety, 28, 29–35. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/jspui/handle/123456789/1816>

Я. Ю. Кальченко, PhD, доц. каф.

К. А. Афанасенко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф.

В. В. Олійник, к.т.н., доцент, нач. каф.

О. В. Борсук, к.т.н., доцент, викл. каф.

О. В. Костирка, к.т.н., доцент, ст. викл. каф.

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАМП РІЗНИХ ТИПІВ ПРИ АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Проведені дослідження з визначення температури електричних ламп різних типів при аварійних режимах роботи електромереж, а саме при перенапрузі. Побудовані графіки залежностей температури колби ламп розжарювання, дугових ртутних ламп та світлодіодних ламп від напруги, що подається на них. Отримані математичні моделі величини температури нагрівання колби електричної лампи розжарювання, дугової ртутної лампи та світлодіодної лампи в залежності від часу. Визначено, що температура колби електричної лампи розжарювання зростає за експоненціальним законом і приблизно через 300 секунд стабілізується. Температура дугової ртутної лампи також змінюється за експоненціальним законом, але, у порівнянні з лампою розжарювання, не так стрімко, а стабілізується приблизно через 600 секунд. Визначено, що при аварійних режимах роботи температура ламп розжарювання та дугових ртутних ламп може перевищувати нормативні значення температурних груп, внаслідок чого при використанні їх в середовищах, де присутні вибухонебезпечні гази або пари вони може стати джерелом запалювання і призвести до вибуху або загоряння цих речовин. Визначено, що температура світлодіодної лампи змінюється

за лінійним законом і через 300 секунд перестає зростати. Побудовані залежності температури різних елементів світлодіодної лампи в залежності від поданої на неї електричної напруги. Встановлено, що найбільше при роботі світлодіодної електричної лампи нагрівається драйвер, а саме чіп керування живленням. Визначено, що при зменшенні електричної напруги чіп керування живленням нагрівається більше, але незначно. Встановлено, що світлодіодна лампа є найкращою з точки зору пожежної безпеки, оскільки має найнижчу температуру, а також найменше реагує зміну напруг електричної мережі, що пояснюється її конструкцією та принципом дії.

Ключові слова: температура лампи, перенапруга, знижена напруга, пожежна небезпека

Література

1. Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації, які виникли в Україні у 2024 році. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/2/8/5/6/0/6/analitchna-dovidka-pro-pojeji-102024-ost.pdf>
2. Лин А. С., Кравець І. П., Ференц Н. О., Пелешко М. З. Чинники пожежної небезпеки кабельної продукції. Збірник наукових праць «Пожежна безпека». 2023. № 42. С. 56–64. doi: 10.32447/20786662.42.2023.07
3. Кальченко Я. Ю, Афанасенко К. А., Липовий В. О., Пікалов М. В. Визначення параметрів електричних провідників при аварійному режимі роботи. Збірник наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій». 2023. № 37. С. 305–316. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-22
4. Jun Deng, Qingwen Lin, Yang Li, Caiping Wang, Huaibin Wang, Pengrui Man. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene (PE) copper wires. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148. P. 11695–11705. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-023-12522-5>
5. Zhang Y., Tang K., Z. Liu Y. Chen Experimental study on thermal and fire behaviors of energized PE-insulated wires under overload currents. 2021. Vol. 145. P. 345–351. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-020-09745-1?fromPaywallRec=true>
6. Jun Deng, Qing-Wen Lin, Yang Li, Huai-Bin Wang, Cai-Ping Wang, Yan-Hong Zhao, Hui-Fei Lyu, Chi-Min Shu. Ignition and Flame Spreading Features of Excessively Overloaded Polyvinyl Chloride Copper Wires. Fire Technology. 2023. Vol. 59. P. 3589–3607. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10694-023-01482-9?fromPaywallRec=true>
7. Зобенко О. О. Модель протипожежного захисту електричних мереж у місцях контактних з'єднань. Науковий вісник «Цивільний захист та пожежна безпека». 2023. Вип. 1(15). С. 141–148. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15).141-148
8. Toni Israel, Stephan Schlegel, Steffen Großmann, Tom Kufner, George Freudiger. Modelling of Transient Heating and Softening Behaviour of Contact Points During Current Pulses and Short Circuits. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2019. doi: 10.1109/HOLM.2019.8923941
9. Назаровець О., Перерва Р., Рудик Ю., Кириченко О. Експериментальне дослідження параметрів пожежної безпеки контактних з'єднань в електропроводках. Журнал наукових праць: Journal of Scientific Papers Social development & Security. 2024. Вип. 14(2). С. 161–178. doi: 10.33445/sds.2024.14.2.15
10. Гичпан В. М., Петровський В. Л., Рудик Ю. І. Стандартизація випробувань характеристик світлодіодних модулів. Збірник наукових праць ЛДУ БЖД. Пожежна безпека. 2016. № 28. С. 29–35.

Надійшла до редколегії: 21.02.2025

Прийнята до друку: 20.04.2025

А. С. Лесько¹, ад'юнкт (ORCID 0009-0003-2053-2362)

О. В. Кулаков¹, к.т.н., доцент, пров.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)

А. М. Катунін², к.т.н., с.н.с., н.с. відділу (ORCID 0000-0003-2171-4558)

І. Г. Маладика³, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8784-2814)

¹Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

²Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, м. Харків, Україна

³Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна

КІНЕТИКА ХІМІЧНОЇ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ХЛОРУ ДРІБНОДИСПЕРСНИМ ПОТОКОМ ВОДИ З НЕЙТРАЛІЗАТОРОМ

Досліджена кінетика хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні. Показано, що активність хімічних нейтралізаторів, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, є різною при хімічній реакції з хлором. Обґрунтовано доцільність для практичного використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. На основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води побудована математична модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Досліджена кінетика процесу хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з гідроксидом натрію. Додавання гідроксиду натрію до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою. Інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію доцільно обмежити величинами $1,5 \div 1,7$ л/(с·м²). Збільшення концентрації нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору. При хімічній нейтралізації (осадженні) газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з добавкою гідроксид натрію доцільно використання насичених розчинів. При інтенсивності 2,0 л/(с·м²) подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації 0,5 кг/кг гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору збільшується на 90 %, а при концентрації 1,0 кг/кг – на 140 %.

Ключові слова: дрібнодисперсний потік води, модель, рівнянням хімічної кінетики, хімічна нейтралізація, хлор

1. Вступ

На хімічно небезпечних об'єктах постійно існує ризик виникнення аварій, що супроводжуються викидом хімічно небезпечних речовин в атмосферу. Гамма небезпечних хімічних речовин є досить широкою, але найбільш часто зустрічаються хлор та аміак.

Внаслідок широкого застосування хлору на об'єктах водопідготовки та водовідведення, аварії з викидом газоподібного хлору набули широкого розповсюдження у мирний час. Найбільш відомою є аварія в США, що відбулася 28 лютого 2019 року на підприємстві з водопостачання Birmingham Water Works (м. Бірмінгем) [1]. В Україні остання з відомих є аварія, що відбулася 01 грудня 2021 року на території підприємства «Південьвійськбуд» (м. Одеса). Ліквідацію наслідків таких аварій в Україні здійснюють підрозділи оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

Під час Великої війни (Першої Світової війни) хлор широко використовувався як хімічна зброя. Висока ефективність застосування хлору як бойової отруйної речовини була обумовлена неготовністю воюючих сторін до захисту та психологічним шоком від застосування нової зброї масового ураження. Після Великої війни засто-

сування хлору як бойової отрутої речовин носило епізодичний характер. Підтримку військ в операціях до, під час та після застосування хімічної зброї здійснюють війська радіаційного, хімічного та біологічного захисту Збройних Сил України.

Актуальність роботи у теперішній час додатково обумовлена відкритим воєнним нападом російської федерації на Україну, що відбувся 24 лютого 2022 року. Виникла загроза викиду хімічно небезпечних речовин внаслідок пошкодження технологічного обладнання хімічно небезпечних об'єктів внаслідок ведення бойових дій. У 2023 році ворожа ракета Х-22 влучила у магістральний аміакопровід Тольятті-Одеса та пошкодила його. Бойові дії тривають вже понад три роки. Ворогу не вдається добитися відчутних перемог за допомогою конвенційної зброї. Тому є ймовірність застосування хімічної зброї проти Збройних Сил України.

Ліквідація аварій з викидом хлору (або наслідків його бойового застосування) є складним завданням. Властивості хлору є смертельно небезпечними для життя людини. Хлор також є небезпечним з екологічної точки зору.

Основним методом нейтралізації хлору є осадження газової хмари водою. Це дозволяє відносно швидко та дешево зменшити у хмарі концентрацію хлору до безпечної.

Додатковим способом підвищення ефективності знешкодження хлору є його нейтралізація за допомогою хімічно активних речовин (нейтралізаторів), що додаються до дрібнодисперсного потоку води під час ліквідації аварії. На сьогодні розроблено методи прогнозування нейтралізації (осадження) небезпечних газів, але практично усі вони спрямовані на гази, що є легшими відносно повітря.

Таким чином, захист населення й військовослужбовців Збройних Сил України від впливу небезпечних хімічних речовин (у тому числі й бойових) є актуальним державним завданням в умовах воєнного стану. Існує проблема підвищення ефективності нейтралізації газоподібного хлору при викиді його в атмосферу.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Хлор є небезпечною хімічною речовиною, яка за нормальних умов є газом й переходить у рідкий стан при температурі мінус 34 °С [2].

Як показано в роботі [3] найбільш часто нейтралізація хімічно небезпечних газів, що потрапили в атмосферу, здійснюється шляхом осадження за допомогою дрібнодисперсних потоків чистої води. Перевагою застосування дрібнодисперсного потоку чистої води для нейтралізації хімічно небезпечних газів є простота та дешевина цього способу. З хімічної точки зору нейтралізація небезпечних газів з атмосфери чистою водою відбувається внаслідок міжфазового масообміну. Осадження хмари хімічно небезпечних газів дозволяє обмежити розміри зони хімічного забруднення [4], а й, за відповідних умов, повністю припинити розповсюдження цих газів [5]. В роботі [6] показано, що оптимізація дисперсності потоку води, що подається, дозволяє майже вдвічі скоротити час осадження небезпечної речовини, зокрема газів, що є легшими відносно повітря.

Недоліком застосування дрібнодисперсного потоку чистої води для нейтралізації хімічно небезпечних газів є низька ефективність нейтралізації, особливо для газів, що є важкими відносно повітря. В роботі [7] показано, що інтенсивність осадження хлору, що є важким газом відносно повітря, дрібнодисперсними потоками чистої води складає усього 6 % від інтенсивності осадження аміаку, що є легким газом відносно повітря, при оптимальній інтенсивності подачі та дисперсності кра-

пель водного потоку. Таким чином, загальним недоліком робіт [3–6] є можливість застосування їх результатів для нейтралізації газів, що є легшими відносно повітря.

В роботі [8] показано, що підвищення інтенсивності нейтралізації хімічно небезпечних газів, що потрапили в атмосферу, можна отримати шляхом додавання хімічних добавок (нейтралізаторів) до води, які нейтралізують їх внаслідок відповідних хімічних реакцій. Але в роботі відсутні рекомендації по оптимальності застосування нейтралізаторів різного типу та чисельні рекомендації щодо інтенсивності їх подачі.

Таким чином, нерозв'язаною частиною розглянутої проблеми є відсутність математичної моделі, яка описує процес нейтралізації газоподібного хлору (газу, що є важким відносно повітря) за допомогою додавання до дрібнодисперсного потоку води хімічно активних речовин – нейтралізаторів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка моделі нейтралізації газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з додаванням хімічних нейтралізаторів та дослідження кінетики процесу нейтралізації.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Дослідити активність хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів до дрібнодисперсного потоку води при осадженні.
2. Побудувати модель та дослідити кінетику процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес хімічної нейтралізації газоподібного хлору при його примусовому осадженні дрібнодисперсним потоком води з додаванням нейтралізатору.

Предметом дослідження є параметри нейтралізації газової хмари при ліквідації аварій з викидом газоподібного хлору шляхом примусового осадження дрібнодисперсним потоком води з додаванням хімічного нейтралізатору.

Гіпотезою дослідження є припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Це дозволить побудувати на основі раніше запропонованої моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором.

Для побудови моделі хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором використовуємо стандартне рівняння хімічної кінетики.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple та MatLab.

5. Дослідження активності хімічної нейтралізації хлору при додаванні нейтралізаторів

Найпростішим методом нейтралізації хлору є його осадження за допомогою потоку дрібнодисперсної води, що формується відповідними стволами. При 10 °C та атмосферному тиску один літр води нейтралізує до 3,10 л газоподібного хлору, при 30 °C та атмосферному тиску один л води нейтралізує до 1,77 л газоподібного хлору [2]. Процес нейтралізації супроводжується хімічною реакцією:



Утворюються соляна (хлоридна) кислота HCl , яка за силою є сильною кислотою, та хлорноватиста кислота HClO , яка за силою є слабкою кислотою [9, 10]. Властивості кислоти залежать від її концентрації у водному розчині. Концентрованою вважається соляна кислота, що містить 37 % HCl у воді. Хлорноватиста кислота є нестійкою й розкладається у водному розчині на соляну кислоту та атомарний кисень:



В роботі [7] показано, що збільшення інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води при осадженні хлору з атмосфери не дозволяє досягти навіть середніх показників інтенсивності нейтралізації у порівнянні з іншими небезпечними газами. Зокрема, при інтенсивності подачі 2 л/с/м^2 потоку чистої води з дисперсністю крапель 1 мкм інтенсивність нейтралізації хлору складає $3,0 \cdot 10^3 \text{ моль/с/м}^3$. Також встановлено, що при інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води більше від $I_w = 1,57 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$, інтенсивність нейтралізації хлору практично не збільшується. Це пов'язано із непропорційно низькою величиною постійної Генрі H хлору у порівнянні з іншими небезпечними газами. Для газу аміак NH_3 постійна Генрі хлору менше у 290 разів, парів соляної кислоти HCl – у 204 рази, парів дихлорангідрид вугільної кислоти (фосген) COCl_2 – у 118 разів, парів синильної кислоти (ціанід водню) HCN – у 80 разів [11]. Як наслідок, хлор має низьку розчинність у воді у порівнянні, наприклад, з аміаком.

Для збільшення інтенсивності нейтралізації хлору до води додаються хімічно-активні речовини – сполуки лужних металів натрію, калію та кальцію (гідроксид натрію NaOH , гідроксид калію KOH , карбонат натрію Na_2CO_3 , гідроксид кальцію Ca(OH)_2 , сульфід натрію Na_2SO_3 , тіосульфат натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), а також хлорид заліза FeCl_2 та перекис водню H_2O_2 [12].

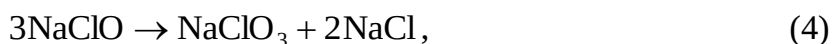
Розглянемо більш детально хімічні реакції нейтралізації хлору за допомогою дрібнодисперсного потоку води з переліченими нейтралізаторами.

Для нейтралізатору водний розчин розчину гідроксиду натрію:



енергія Гіббса (термодинамічний потенціал) системи $\Delta G = -524,11 \text{ кДж/кг}$.

Утворений при цьому гіпохлорит натрію звичайно розкладається з утворенням хлориду натрію та кисню:



Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду калію:



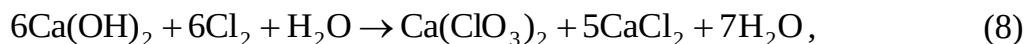
енергія Гіббса системи $\Delta G = -223,24 \text{ кДж/кг}$.

Для нейтралізатору водний розчин карбонату натрію:



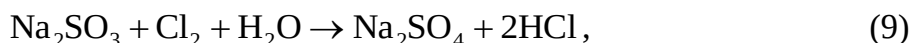
енергія Гіббса системи $\Delta G = 801,1$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин гідроксиду кальцію:



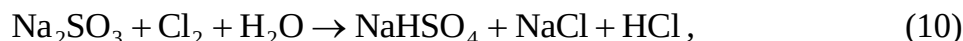
енергія Гіббса системи $\Delta G = -795,19$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин сульфіту натрію:



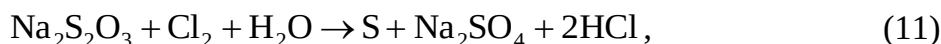
енергія Гіббса системи $\Delta G = -294,56$ кДж / кг .

Або



енергія Гіббса системи $\Delta G = -217,33$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин тіосульфату натрію:



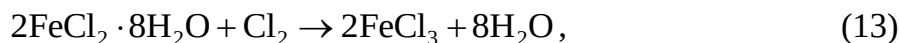
енергія Гіббса системи $\Delta G = -1087,46$ кДж / кг .

Або



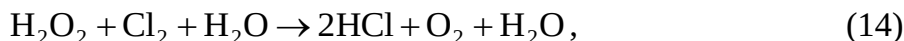
енергія Гіббса системи $\Delta G = -1299,1$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин хлориду заліза:



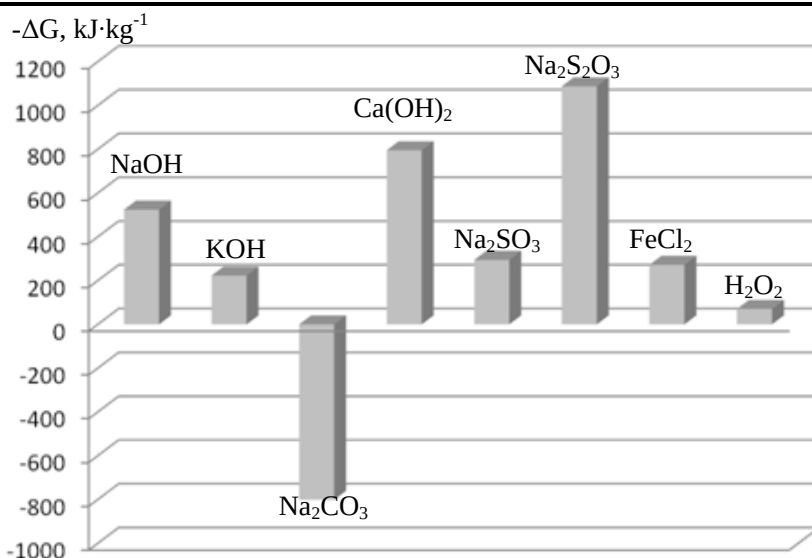
енергія Гіббса системи $\Delta G = -272,0$ кДж / кг .

Для нейтралізатору водний розчин перекису водню:



енергія Гіббса системи $\Delta G = -70,18$ кДж / кг .

Енергія Гіббса ΔG реакції є показником активності хімічної реакції. Тому при відповідності решти параметрів процесу сорбції по цьому показнику можна оцінювати активність нейтралізаторів. На рис. 1 для порівняння приведена величина енергії Гіббса ($-\Delta G$) для основних видів нейтралізаторів хлору.

Рис. 1. Величина енергії Гіббса ($-\Delta G$) для основних видів нейтралізаторів хлору

6. Моделювання та дослідження кінетики процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води

В присутності хімічної реакції абсорбенту з абсорбатом для розрахунку швидкості V_{sorb} абсорбції хлору є некоректним використання рівняння (7) [7]:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{D_{\text{drop}}}{\pi \tau}}, \quad (15)$$

де I_{coll} – частота зіткнень молекул хлору з поверхнею краплі (розраховується за формулою (4) [7]), θ_{sorb} – коефіцієнт насичення поверхневого шару води абсорбованим газом (розраховується за формулою (5) [7]), α – коефіцієнт акомодатії, D_{drop} – коефіцієнт дифузії краплини дрібнодисперсного потоку, τ – характерний час процесу.

В таких випадках необхідним є врахування швидкості V_{react} хімічної реакції, яка розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики:

$$V_{\text{react}} = k \cdot C_A^a \cdot C_B^b, \quad (16)$$

де k – константа швидкості реакції, C_A та C_B – молярні концентрації реагентів А та В, а та b – кінетичний порядок реакції по речовині А та В відповідно.

З урахуванням енергії Гіббса ΔG константа швидкості реакції k визначається як:

$$k = \exp\left(\frac{\Delta G}{R \cdot T}\right). \quad (17)$$

З урахуванням рівнянь (16) та (17) рівняння (15) для розрахунку швидкості V_{sorb} абсорбції газу дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором можна записати наступним чином:

$$V_{\text{sorb}} = I_{\text{coll}} \cdot \theta_{\text{sorb}} \cdot \alpha \cdot \sqrt{D_{\text{drop}} \cdot V_{\text{react}}} \quad (18)$$

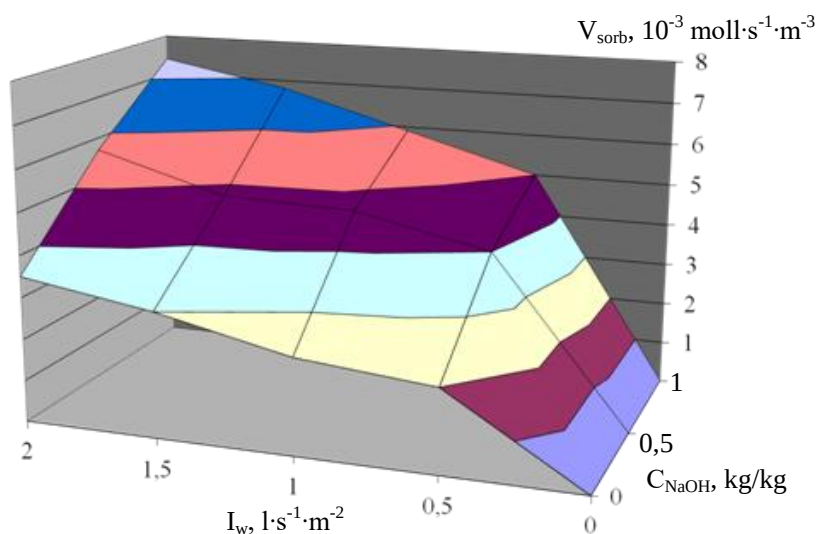


Рис. 2. Кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації C_{NaOH} нейтралізатора у воді

На рис. 2 приведена кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатору гідроксид натрію NaOH та його концентрації C_{NaOH} у воді, розраховані за формулою (18). Дисперсність потоку прийнята рівною 1 мкм.

7. Обговорення результатів моделювання нейтралізації хлору

Проведений аналіз активності хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води, показав, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором.

Низьку активність при реакції з хлором мають нейтралізатори гідроксид калію KOH , сульфат натрію Na_2SO_3 , хлорид заліза FeCl_2 та перекис водню H_2O_2 . Також в результаті хімічної реакції нейтралізації при використанні цих речовин утворюється хімічно сильна соляна кислота HCl .

Найбільшу хімічну активність до хлору має тіосульфат натрію $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, однак, як показано вище, водний розчин даної речовини з хлором реагує з утворення відразу двох сильних кислот – сірчаної H_2SO_4 та соляної HCl . Відповідно при осадженні газоподібного хлору з атмосфери такими розчинами може відбутися екологічне забруднення ґрунту. В деяких випадках це може призвести до виникнення небезпеки для рятувальників, які знаходяться у безпосередній близькості до зони осадження й можуть контактувати з рідиною, що розтікається по поверхні після осадження. Крім цього сірчана H_2SO_4 та соляна HCl кислоти призводять до пошкодження рятувального обладнання – пожежних автомобілів та пожежно-технічного обладнання, що задіяне для ліквідації аварії.

Таким чином, для практичного використання підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту слід рекомендувати використання двох хімічних нейтралізаторів хлору – гідроксиду натрію NaOH або гідроксиду каль-

цію $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Як видно з рівнянь (3–5) хімічних реакцій при взаємодії гідроксиду натрію NaOH з хлором утворюється хлорат натрію NaClO , який у подальшому розкладається з утворенням малоактивної солі хлорид натрію NaCl (поварена сіль). З рівняння (8) видно, що при хімічній реакції гідроксиду кальцію $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з хлором утворюється малоактивна сіль хлорид кальцію CaCl_2 (морська сіль).

Різну активність хімічних нейтралізаторів, що додаються до дрібнодисперсного потоку води при хімічній реакції з хлором, можна пояснити різними хімічними властивостями досліджених нейтралізаторів

Особливістю запропонованого методу моделювання процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором є застосування стандартного рівняння хімічної кінетики для розрахунку швидкості хімічної реакції у методі моделювання процесу нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води. Внаслідок цього підвищується адекватність моделювання для випадку застосування хімічних нейтралізаторів при відносно незначному ускладненні чисельного розрахунку.

На рис. 2 приведена кінетика швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору в залежності від інтенсивності I_w подачі водного розчину нейтралізатора гідроксид натрію та концентрації C_{NaOH} нейтралізатора у воді. Видно, що швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору при його осадженні дрібнодисперсним потоком води без добавок збільшується зі збільшенням інтенсивності I_w його подачі. При збільшенні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку чистої води від 0 до $I_w = 0,5 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ спостерігається збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору від 0 до $V_{\text{sorb}} = 2,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. Подальше збільшення інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку чистої води до значення $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ призводить до менш швидкого збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору до величини $V_{\text{sorb}} = 3,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку чистої води більше ніж $I_w = 1,57 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, інтенсивність нейтралізації хлору практично не збільшується, що підтверджує відповідність побудованої моделі нейтралізації результатам попередніх досліджень [4].

Додавання нейтралізатору гідроксид натрію NaOH до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою.

При концентрації $C_{\text{NaOH}} = 0,5 \text{ кг}/\text{кг}$ гідроксиду натрію у воді відбувається збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору. При збільшенні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до $I_w = 0,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ спостерігається збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору від 0 до $V_{\text{sorb}} = 4,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. Подальше збільшення інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення $I_w = 1,6 \text{ л}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ призводить до менш швидкого збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору до величини $V_{\text{sorb}} = 5,0 \text{ моль}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж

$I_w = 1,6 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ інтенсивність нейтралізації хлору збільшується менш інтенсивно до величини $V_{\text{sorb}} = 5,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ при $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$.

При концентрації $C_{\text{NaOH}} = 1,0 \text{ кг/кг}$ гідроксиду натрію у воді відбувається ще більш інтенсивне збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору. При збільшенні інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором від 0 до $I_w = 0,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ спостерігається збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору від 0 до $V_{\text{sorb}} = 5,0 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$. Подальше збільшення інтенсивності I_w подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором до значення $I_w = 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ призводить до менш швидкого збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору до величини $V_{\text{sorb}} = 6,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$. При інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором більше ніж $I_w = 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ інтенсивність нейтралізації хлору збільшується менш інтенсивно до величини $V_{\text{sorb}} = 7,4 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ при $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$.

Таким чином можна зробити висновок, що інтенсивність I_w подачі дрібнодисперсного потоку як чистої води, так й з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH доцільно обмежити величинами $I_w = 1,5 \div 1,7 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$. Це пояснюється тим, що при подальшому збільшенні I_w швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору збільшується незначно. Збільшення концентрації C_{NaOH} нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору. Так при максимально дослідженій інтенсивності $I_w = 2,0 \text{ л/(с} \cdot \text{м}^2)$ подачі дрібнодисперсного потоку швидкість V_{sorb} абсорбції газоподібного хлору збільшується від $V_{\text{sorb}} = 3,0 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ для дрібнодисперсного потоку чистої води до $V_{\text{sorb}} = 5,8 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації $C_{\text{NaOH}} = 0,5 \text{ кг/кг}$ (у 1,9 разів) й до $V_{\text{sorb}} = 7,4 \text{ моль/(с} \cdot \text{м}^3)$ для дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію NaOH в концентрації $C_{\text{NaOH}} = 1,0 \text{ кг/кг}$ (у 2,4 рази).

8. Висновки

1. Проведені дослідження хімічної активності нейтралізаторів гідроксид натрію, гідроксид калію, карбонат натрію, гідроксид кальцію, сульфід натрію, тіосульфат натрію, хлорид заліза та перекис водню, що можуть додаватися до дрібнодисперсного потоку води, показали, що вони мають різну активність при хімічній реакції з хлором. Низьку активність мають гідроксид калію, сульфід натрію, хлорид заліза та перекис водню. В результаті хімічної реакції нейтралізації при використанні цих речовин утворюється соляна кислота, яка відноситься до сильних кислот. Найбільшу хімічну активність до хлору має тіосульфат натрію. Однак водний розчин тіосульфат натрію реагує з хлором з утворення сірчаної та соляної кислот, які є сильними. Для практичного використання доцільно використання хімічних нейтралізаторів хлору гідроксид натрію або гідроксид кальцію. Внаслідок хімічних реакцій водних розчинів гідроксиду натрію та гідроксиду кальцію з хлором утворюються малоактивні хлорид натрію (поварена сіль) та хлорид кальцію (морська сіль).

2. Побудована математична модель нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з хімічним нейтралізатором. В основу моделі покладено припущення, що при хімічній нейтралізації хлору з дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором, швидкість хімічної реакції розраховується за стандартним рівнянням хімічної кінетики. Це дозволило побудувати на основі моделі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води модель хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком з нейтралізатором. Працездатність побудованої моделі перевірена на прикладі нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком чистої води. Досліджена кінетика процесу хімічної нейтралізації хлору дрібнодисперсним потоком води з нейтралізатором гідроксид натрію. Додавання гідроксиду натрію до дрібнодисперсного потоку води веде до збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору в усьому діапазоні зміни інтенсивності подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором з динамікою, що є подібною випадку нейтралізації чистою водою. Інтенсивність подачі дрібнодисперсного потоку води з нейтралізатором гідроксид натрію (як й чистої води) доцільно обмежити величинами $1,5 \div 1,7 \text{ л/(с}\cdot\text{м}^2)$. Збільшення концентрації нейтралізатору у воді веде до значного збільшення швидкості нейтралізації газоподібного хлору. При дослідженій інтенсивності $2,0 \text{ л/(с}\cdot\text{м}^2)$ подачі дрібнодисперсного потоку та при концентрації $0,5 \text{ кг/кг}$ гідроксиду натрію у воді швидкість нейтралізації газоподібного хлору збільшується на 90 %, а при концентрації $1,0 \text{ кг/кг}$ – на 140 %. Тому при хімічній нейтралізації (осадженні) газоподібного хлору дрібнодисперсним потоком води з добавкою гідроксид натрію доцільно використання насичених розчинів. Для перевірки адекватності побудованої моделі та підтвердження достовірності отриманих результатів є необхідним проведення експериментальних досліджень, що заплановано.

Література

1. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. URL: <https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html>
2. Chlorine. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>
3. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. Eastern-European Journal of Enterprise. 2019. Vol. 1. № 10(97). P. 29–35.
4. Yan X., Zhou Y., Diao H., Gu H., Li Y. Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. Annals of Nuclear Energy. 2020. Vol. 142. P. 107394.
5. Kustov M. V., Melnychenko A. S., Taraduda D. V., Korogodska A. M. Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2021. Vol. 1038. P. 361–373.
6. Elperin T., Fominykh A., Krasovitev B., Vikhansky A. Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45. Issue 14. P. 2427–2433.
7. Лесько А. С. Інтенсивність хімічної нейтралізації хлору при осадженні дрібнодисперсним рідинним потоком. Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура. 2024. Т. 6. Вип. 187. С. 278–283.

8. Wei L. Research on Countermeasures and Methods of Disposing Incidents of Hazardous Chemicals Reacting with Water. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 26. P. 2278–2286.

9. Hydrochloric acid. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric_acid

10. Hypochlorous acid. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous_acid

11. Sander R. Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry. Mainz: Max-Planck Institute of Chemistry, 1999. 107 p. URL: https://www.ready.noaa.gov/documents/TutorialX/files/Chem_henry.pdf

12. Neutralisation of chlorine and sulphur dioxide. URL: <https://www.i4t.pl/en/technologies/neutralisation-of-chlorine-and-sulphur-dioxide>

A. Lesko¹, Adjunct

O. Kulakov¹, PhD, Associate Professor, Leading Researcher of the Department

A. Katunin², PhD, Senior Research Scientist, Researcher of the Department

I. Maladyka³, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

²*Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine*

³*Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine*

KINETICS OF CHEMICAL NEUTRALISATION OF CHLORINE BY A SMALL DISPERSED WATER STREAM WITH A NEUTRALISER

The kinetics of chemical neutralization of chlorine when neutralizers are added to a fine water stream during precipitation is investigated. It has been shown that the activity of chemical neutralizers that can be added to a fine water stream is different in the chemical reaction with chlorine. The practical application of sodium hydroxide or calcium hydroxide as chemical chlorine neutralisers is proposed. On the basis of the model of chlorine neutralisation by a small dispersed stream of clean water, a mathematical model of chlorine neutralisation by a small dispersed stream of water with a chemical neutraliser was developed. The model is based on the assumption that during the chemical neutralisation of chlorine with a small dispersed water stream with a neutraliser, the chemical reaction rate is calculated according to the standard chemical kinetics equation. The kinetics of the process of chemical neutralisation of chlorine by a small dispersed water stream with sodium hydroxide has been studied. The addition of sodium hydroxide to the small dispersed water stream leads to an increase in the rate of neutralisation of gaseous chlorine over the full range of changes in the intensity of the small dispersed water stream with the neutraliser with dynamics similar to the case of neutralisation with pure water. It is recommended to limit the intensity of the supply of a small dispersed stream of water with the sodium hydroxide neutraliser to $1.5 \div 1.7 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$. An increase in the concentration of the neutraliser in water will result in a significant increase in the rate of neutralisation of gaseous chlorine. For chemical neutralisation (deposition) of gaseous chlorine with a small dispersed water stream with the addition of sodium hydroxide, it is advisable to use concentrated mixtures. At an intensity of $2.0 \text{ l/(s} \cdot \text{m}^2)$ of a small dispersed water stream and a concentration of 0.5 kg/kg of sodium hydroxide in the water, the rate of neutralisation of gaseous chlorine increases by 90 %, and at a concentration of 1.0 kg/kg – by 140 %.

Keywords: chemical kinetics equation, chemical neutralisation, chlorine, model, small dispersed water stream

References

1. Toxic gas at Birmingham water treatment plant sends 55 workers to hospitals. Available at: <https://www.al.com/news/birmingham/2019/02/multiple-ambulances-called-in-hazmat-incident-at-birmingham-water-treatment-plant.html>

2. Chlorine. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine>

3. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of

cities with the help of recurrence measures. *Eastern-European Journal of Enterprise*, 1(10((97))), 29–35.

4. Yan, X., Zhou, Y., Diao, H., Gu, H., Li Y. (2020). Development of mathematical model for aerosol deposition under jet condition. *Annals of Nuclear Energy*, 142, 107394.

5. Kustov, M. V., Melnychenko, A. S., Taraduda, D. V., Korogodska, A. M. (2021). Research of the chlorine sorption processes when its deposition by water aerosol. *Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd*, 1038, 361–373.

6. Elperin, T., Fominykh, A., Krasovitev, B., Vikhansky, A. (2011). Effect of rain scavenging on altitudinal distribution of soluble gaseous pollutants in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 45(14), 2427–2433.

7. Les'ko, A. S. (2024). Intensyvniŭ khimichnoyi neytralizatsiyi khloru pry osadzhenni dribnodispersnym ridynnym potokom. *Komunal'ne hospodarstvo mist. Seriya: tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 6(187), 278–283.

8. Wei, L. (2011). Research on Countermeasures and Methods of Disposing Incidents of Hazardous Chemicals Reacting with Water. *Procedia Engineering*, 26, 2278–2286.

9. Hydrochloric acid. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrochloric_acid

10. Hypochlorous acid. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Hypochlorous_acid

11. Sander, R. (1999). *Compilation of Henry's Law Constants for Inorganic and Organic Species of Potential Importance in Environmental Chemistry*. Mainz: Max-Planck Institute of Chemistry, 107. Available at: https://www.ready.noaa.gov/documents/TutorialX/files/Chem_henry.pdf

12. Neutralisation of chlorine and sulphur dioxide. Available at: <https://www.i4t.pl/en/technologies/neutralisation-of-chlorine-and-sulphur-dioxide>

Надійшла до редколегії: 25.02.2025

Прийнята до друку: 23.04.2025

УДК 614.84

О. О. Кіреєв, д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)

Ю. К. Гапон, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3304-5657)

М. А. Чиркіна-Харламова, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)

В. М. Нуянзін, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0003-4785-0814)

А. О. Майборода, к.пед.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6108-9772)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВОГНЕГАСНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛЕГКИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ГАСІННІ АЦЕТОНУ

Проведено експериментальне дослідження вогнегасної здатності систем, створених на основі легких сипких пористих матеріалів, при ліквідації займання ацетону. Для цього використано модифіковану методику визначення вогнегасної ефективності, яка раніше була застосована для етанолу. Як вогнегасні матеріали досліджувалися подрібнене піноскло, а також гранульовані форми спучених перліту та вермікуліту. В якості нижнього шару, що забезпечує плавучість вогнегасної системи використано гранульоване піноскло з розміром частинок у межах 10–15 мм. Як верхній шар, що забезпечує високі ізолюючі властивості розглянуто спучений перліт з розміром кулястих гранул діаметром 1–1,5 мм і спучений пластинчастий вермікуліт з лінійним розміром пластинок 1×2 мм. Експериментально встановлені плавучість обраних сипких матеріалів в ацетоні, їх насипну густину і вологоутримання. На основі експериментальних результатів розраховані висоти шарів сухих та змочених сипких матеріалів, що необхідні для гасіння ацетону. Встановлено, що попереднє змочування сипких матеріалів значно підвищує їхню вогнегасну здатність. Цей факт пояснюється двома факторами – підвищенням ізолюючих властивостей перліту та вермікуліту за рахунок заповнення порожнин між гранулами перліту і вермікуліту та зниженням концентрації пари ацетону за рахунок його абсорбції водою. Також введення води приводить до підвищення охолоджуючих властивостей вогнегасної системи. Найменші висоти вогнегасних шарів під час гасіння ацетону забезпечують системи: змочене піноскло – 6,5 см і піноскло (5,5 см)+перліт (1 см)+вода. Проведено експертне оцінювання комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем при гасінні ацетону. Намічені подальші напрямки досліджень вогнегасних характеристик систем на основі сипких пористих матеріалів і методи встановлення комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння.

Ключові слова: ацетон, вермікуліт, вогнегасні здатність, подрібнене піноскло, перліт, спучені сипкі матеріали

1. Вступ

Гасіння полярних легкозаймистих рідин (ПЛЗР) має суттєві особливості по зрівнянню з гасінням неполярних рідин. Звичайні піноутворювачі (ПУ) забезпечують утворення повітряно-механічних пін (ПМП), які руйнуються під час контакту з ПЛЗР [1–4]. Це потребує використовувати для утворення стійких по відношенню до ПЛЗР пін. Для цього необхідно використовувати піноутворювачі спеціального призначення. Такі піни мають меншу ніж звичайні ПМП стійкість, особливо швидко вони руйнуються під дією інтенсивних теплових потоків. Ще одним недоліком цих пін є наявність в їх складі екологічно небезпечних речовин [5–7].

Розробка ПУ спеціального призначення ведеться в напрямку забезпечення ефективного гасіння спиртів. Іншим полярним рідинам приділяється невелика увага. Так в останні роки в літературі не знайдено матеріалів по гасінню такий ПЛЗР як ацетон (номенклатурна назва пропанон), який знайшов великі застосування в різних галузях.

У великих кількостях ацетон використовується як добрий розчинник для полярних і неполярних органічних речовин. Так він здатен розчиняти жири, оливи,

смоли, каніфоль, целулоїд, нітро- та ацетилцелюлозу. Завдяки здатності розчиняти ацетилен і переводити його в вибухонебезпечний стан використовується в ацетиленовій газорізці та газозварюванні. Він також використовується у виробництві лаків, вибухових речовин та ліків. Щорічне мирове виробництво ацетону в теперішній час перевищує 260 млн тон.

Недоліком ацетону є висока пожежовибухонебезпека. Його температура кипіння складає 56,1 °C, температура спалаху –20 °C, температура самозаймання 465 °C. Межі вибухонебезпечних концентрацій дорівнюють 2,6–12,8 %. [8]. За здатністю до займання ацетон відносять до легкозаймистих речовин. За величиною дипольного моменту (20,9 D) він відноситься до полярних речовин, які необмежено розчиняються у воді і багатьох органічних рідинах.

Таким чином, можна констатувати наявність недоліків у існуючих засобах пожежогасіння в разі потреби гасіння ацетону. Це робить актуальною проблему розробки ефективних засобів гасіння ацетону.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У наукових публікаціях представлено низку нових підходів, спрямованих на підвищення ефективності гасіння легкозаймистих рідин. В роботах [9, 10] запропоновано використання ударних хвиль і динамічних потоків води з великою швидкістю руху. Також ведуться розробки в напрямку застосування дрібнодисперсної води [11] твердих пористих матеріалів [12], піротехнічних складів та складів, що спучуються [13–15]. Але аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок про ряд різних недоліків таких систем в разі потреби гасіння рідин на великій площі. Крім того розглянуті вище засоби гасіння не забезпечують відсутність повторного займання рідини, яку загасили.

Останню вимогу можуть забезпечити вогнегасні системи з високими ізолюючими властивостями та стійкістю. В якості таких систем в роботах [16, 17] було обґрунтовано доцільність застосування вогнегасних засобів в яких використовуються легкі сипкі пористі матеріали. В якості таких матеріалів було обрано гранульоване або подрібнене піноскло (ПС) [18]. Для підвищення ізолюючих властивостей шару ПС нанесеного на поверхню горючої рідини на нею додатково наносився шар дрібних спучених перліту [19] або вермікуліту [20]. Ці сипкі матеріали мають високу термічну стійкість та вони можуть заповнювати порожнини між гранулами нижнього шару ПС, що забезпечує підвищення ізолюючих властивостей бінарної системи ПС + перліт. Ще одним варіантом підвищення ізолюючих властивостей шару ПС є нанесення на його поверхню шару гелю [16]. Результати отримані в роботі [17] вказують на суттєву перевагу у витраті вогнегасних речовин для систем за участю перліту і вермікуліту.

У роботі [21] показано перевагу за параметром ефективність/вартість вогнегасної системи ПС + перліт по зрівнянню з іншими вогнегасними системами, які запропоновані для гасіння горючих та легкозаймистих неполярних рідин. В цій роботі для оцінки фінансових витрат підчас гасіння запропоновано враховувати такі витрати: на вогнегасні речовини, їх зберігання, переробку або утилізацію після закінчення строку їх зберігання, на обладнання та його експлуатацію; на залучення додаткової техніки та персоналу, компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин.

Основні дослідження вогнегасних систем на основі ПС було проведено для

вуглеводневих рідин. Частина таких досліджень було проведено для полярних горючих рідин класу спиртів [22]. В цих роботах було показано, що на вогнегасну здатність систем на основі ПС суттєвий впливають абсорбційні властивості ізолюючих шарів в разі їх змочування водою. Це дозволяє припустити, що такий самий вплив абсорбційних властивостей на вогнегасну здатність систем на основі сипких матеріалів може мати місце і під час гасіння інших полярних горючих рідин завдяки тому, що пари полярних органічних речовин добре поглинаються водою. Подрібнене ПС як раз має відкриті пори в яких може утримуватися велика кількість води. Досліди з гасіння більшості полярних рідин системами на основі ПС не було проведено. В якості такої полярної рідини було обрано ацетон (номенклатурна назва пропанон).

На підставі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність створення високоефективного вогнегасного засобу для гасіння ацетону на основі ПС і спучених перліту і вермікулиту з одночасним введенням до складу вогнегасної системи води. Невирішеним аспектом проблеми розробки такого засобу є брак кількісних даних з вогнегасної здатності таких систем у разі гасіння ацетону.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є експериментальне визначення вогнегасної ефективності систем, що складаються з легких сипких матеріалів із вмістом води, а також вибір найефективнішої системи з точки зору економічної доцільності.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести вибір легких сипких матеріалів для верхнього шару бінарної вогнегасної системи які в найбільшій ступені утримують воду, що забезпечить підвищення ізолюючих і охолоджуючих властивостей вогнегасної системи.

2. Експериментально визначити насипну густину, вологоутримання, здатність заповнювати порожнечі нижнього шару сипких матеріалів та вогнегасну здатність обраних засобів при гасінні ацетону. Дослідити можливість повторного використання обраних сипких матеріалів для гасіння ацетону.

3. Провести оцінку комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження виступає процес гасіння полярної горючої рідини (ацетону) із застосуванням вогнегасних систем, сформованих на основі легких сипких матеріалів. Предмет дослідження – експериментальне встановлення параметрів вогнегасної ефективності сипких пористих матеріалів при гасінні ацетону.

Робочими гіпотезами дослідження є припущення про позитивний вплив попереднього зволоження сипкого матеріалу на вогнегасну ефективність запропонованої пожежогасної системи, а також про потенційну можливість повторного використання зазначених матеріалів для гасіння ацетону.

В роботі застосовані експериментальні методики визначення вогнегасної здатності обраних засобів при гасінні легкозаймистих рідин які удосконалені з урахуванням властивостей систем на основі сипких матеріалів, ситовий аналіз та показники економічної ефективності і метода експертного оцінювання фінансових витрат при гасінні пожеж класу «В».

5. Дослідження вогнегасних властивостей легких сипких матеріалів під час гасіння ацетону

5.1. Вибір легких сипких матеріалів для верхнього шару бінарної вогнегасної системи

Вибір сипких матеріалів для вогнегасної системи базувався на аналізі їхніх фізико-хімічних властивостей, таких як плавучість, вологоутримання, термічна стійкість та здатність до ізоляції горючих рідин. Згідно з результатами попередніх досліджень [16–18, 22], для нижнього шару було обрано подрібнене піноскло (ПС) з розміром частинок 10–15 мм (рис. 1а), що забезпечує високу плавучість та стійкість до термічного впливу.

Для верхнього шару розглядалися два варіанти: спучений подрібнений вермікуліт з розміром пластинок 1×2 мм (рис. 1б) та спучений гранульований перліт з діаметром сферичних гранул 1–1,5 мм (рис. 1в). Ці матеріали обрані з урахуванням їхньої здатності ефективно заповнювати порожнини між гранулами ПС, створюючи щільний ізолюючий шар, який перешкоджає проникненню рідини через нижній шар. Крім того, їхні розміри сприяють утворенню стабільної структури, що підвищує ефективність гасіння.

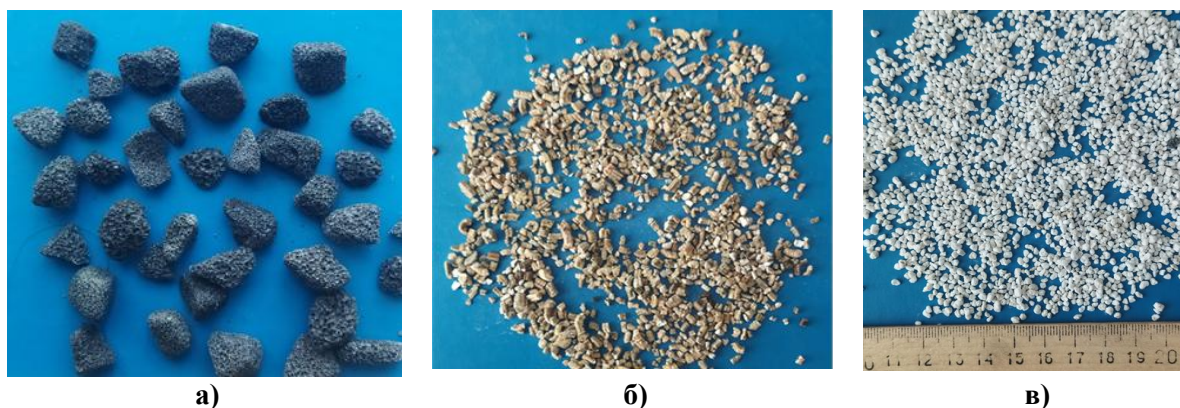


Рис. 1. Зовнішній вигляд матеріалів для верхнього шару: а – піноскло, б – спучений вермікуліт, в – спучений перліт

Комбінація ПС з вермікулітом або перлітом дозволяє створити багатошарову вогнегасну систему, яка поєднує в собі переваги кожного з компонентів, забезпечуючи ефективне гасіння ацетону за рахунок ізоляції пального середовища та зменшення теплового впливу.

5.2. Експериментальне визначення характеристик та вогнегасної здатності сипких матеріалів при гасінні ацетону

В зв'язку з тим, що різні партії сипких матеріалів можуть відрізнятися за своїми властивостями було проведено за методикою [17] експериментальне визначення насипної густини, вологоутримання, здатності заповнювати порожнечі нижнього шару, частки матеріалу, що просипалась крізь нижній шар піноскла і плавучісті в ацетоні запропонованих сипких матеріалів.

Вологоутримання (В) розраховувалося за співвідношенням:

$$B = \frac{m_{H_2O}}{(m_{H_2O} + m_C)}, \quad (1)$$

де m_{H_2O} – маса води, m_C – маса сухого сипкого матеріалу.

Плавучості в ацетоні (Π) визначалась візуально як відношення висоти шару сипучого матеріалу, який знаходиться над рівнем рідини ($h_{\uparrow}$), до загальної висоти шару сипучого матеріалу (h):

$$\Pi = \frac{h_{\uparrow}}{h} = \frac{h_{\uparrow}}{h_{\uparrow} + h_{\downarrow}}, \quad (2)$$

Визначення частки матеріалу, що просипався крізь нижній шар ПС розраховувалась за рівнянням:

$$ПР = \frac{m_2}{m_1}, \quad (3)$$

де m_1 – загальна маса сипкого матеріалу верхнього шару, m_2 – маса сипкого матеріалу верхнього шару, що просипався крізь нижній шар ПС.

Здатність заповнювати порожнечі між гранулами ПС гранулами перліту та вермікуліту оцінювалась візуально за трьохбальною шкалою: 1 – висока, 2 – помірна, 3 – низька. Відповідні результати представлено в табл. 1.

Табл. 1. Розмір гранул (l), плавучість в ацетоні (Π), насипна щільність (ρ), вологоутримання (B), здатність заповнювати порожнечі нижнього шару ($З$), частка матеріалу, що просипалась крізь базовий шар піноскла ($ПР$) для різних сипких матеріалів

Матеріал	l , мм	Π , %	ρ , кг/м ³	B , %	$З$, бали	$ПР$, %
ПС	10–15	50	101	33	3	0
перліт	1–1,5	26	160	46	1	10
вермікуліт	1–2	11	233	49	2	5

Результати наведені в табл. 1 вказують на суттєву перевагу ПС як сипкого матеріалу, який створює умови для плавучості всієї системи. За іншими характеристиками відати перевагу як матеріалу верхнього шару перліту або вермікуліту важко.

Методика проведення експерименту з визначення вогнегасних характеристик систем на основі легких сипких матеріалів була такою самою як в роботі [22]. Як лабораторне модельне вогнище пожежі класу «В» було обрано металеву циліндричну ємність з діаметром внутрішньої частини 11 см і висотою 11 см. В нею заливалось 110 мл ацетону. При цьому висота шару рідини склала 1,1 см. Далі рідина підпалювалась і горіла протягом 1 хвилини. Далі в ємність з рідиною, що горить засипався базовий шар ПС висотою 4 см. При цьому рівень рідини піднімався до ~2 см, а рівень шару ПС яка знаходиться над поверхнею рідини складала ~2 см. Через 1 хвилину після засипання ПС здійснювалась візуальна оцінка ступеня горіння.

Після 1 хвилини горіння з базовим шаром ПС рівномірно по поверхні засипався наступний шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см. Візуальні спостереження показали, що в разі засипання перліту та вермікуліту більша частина цих сипких матеріалів заповнювала порожнини між гранулами базового шару ПС. При цьому загальна висота шару сипких матеріалів не змінювалась. Надалі проводилась візуальна оцінка інтенсивності горіння в балах. Ілюстрація проведення експерименту представлена на рис. 2.

В разі продовження горіння засипався ще один шар сипкого матеріалу висотою 0,5 см. Подальші додаткові засипання сипкого матеріалу проводились до моменту гасіння. В разі загасання модельного вогнища в лабораторних умовах через 1 хвилину проводилось випробування на повторне займання. Для цього на відстань 1 см від поверхні вогнегасного шару підносився вогняний факел. При займанні, що тривало більше 5 с, на поверхню наносився додатковий шар сипкого матеріалу заввишки 0,5 см, і проводився новий експеримент для визначення можливості повторного займання. В разі відсутності повторного займання вважалося, що лабораторне модельне вогнище пожежі класу «В» таким, що погашено.

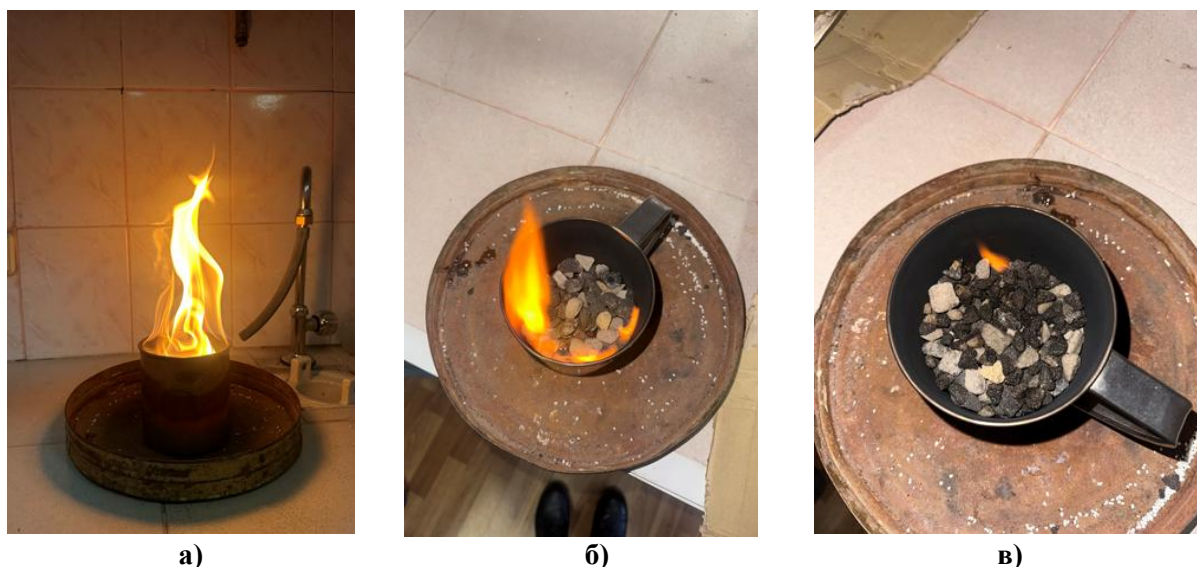


Рис. 2. Етапи гасіння ацетону: а – горіння без шару сипкого матеріалу; б – горінні після засипки базового шару ПС; в – горіння після нанесення шару перліту 0,5 см

Для кожної вогнегасної системи дослідження гасіння виконувалося тричі. Якщо результати припинення горіння в трьох окремих випробуваннях не співпадали, вибирався найгірший результат.

Експерименти з гасіння проводились в двох варіантах – з сухими та змоченими сипкими матеріалами. Змочування ПС здійснювалась зануренням на 1 хвилину ПС у воду з наступним стряхуванням його у ситі. Для спучених перліту і вермікуліту по такий самий методиці як для ПС відбувалось їх грудкування. Тому їх змочування проводилось після нанесення сухого матеріалу на поверхню рідин, що горять шляхом розпилювання води з питомою поверхневою витратою 1 кг/м^2 (10 г на лабораторне модельне вогнище). Для порівняння результатів цієї роботи з результатами для неполярних легкозаймистих рідин було проведено дослідження з гасіння неполярної легкозаймистої рідини бензину А-92. Експериментальні результати представлені в табл. 3.

Табл. 3. Вогнегасні висоти сипких матеріалів у разі нанесення на базовий шар піноскла додаткових шарів сипких матеріалів

Рідина	Вогнегасні висоти сипких матеріалів, см			Вогнегасні висоти змочених матеріалів, см		
	ПС	перліт	вермікуліт	ПС	перліт	вермікуліт
Ацетон	3,5	1,5	2	1	1	1
Бензин А-92	7	2	2	7	1	1,5

Експериментальні результати цієї роботи одержані з використанням «базового шару». При цьому нижній шар ПС осідав на дно ємності з ацетоном. В такому випадку в рідину занурено тільки шар ПС висотою 2 см. Вище цього рівня знаходиться шар ПС висотою 2 см і додатковий шар сухого або змоченого сипкого матеріалу. В умовах реальної пожежі нижній шар ПС повинен бути таким щоб утримувати верхній шар вогнегасної системи. Для розрахунку реальної загальної висоти шарів сипких матеріалів потрібної для гасіння ацетону використано методику наведену в роботі [22]. При цьому були використані результати з плавучості, вологоутримання та насипної густини сипких матеріалів які наведено в табл. 1.

Результати розрахунку висоти вогнегасних шарів сипких матеріалів для випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності з ацетоні наведено в табл. 4.

Табл. 4. Розрахункові вогнегасні висоти сипких матеріалів для випадку коли шар сипкого матеріалу не осідає на дно ємності

Рідина	Вогнегасні висоти сипких матеріалів, см			Вогнегасні висоти змочених матеріалів, см		
	ПС	ПС+перліт	ПС+вермікуліт	ПС	ПС+перліт	ПС+вермікуліт
Ацетон	9,5	6+1,5	6,5+2	6,5	5,5+1	6+1
Бензин А-92	18	6,5+2	7+2	19	5,5+1	6+1,5

Наведені результати вказують на невелику перевагу за висотою вогнегасного шару при гасінні ацетону системи ПС+перліт (сухий) і однакову ефективність систем, ПС і ПС+перліт, в змочену стані. Для гасіння бензину найбільш доцільно використовувати систему ПС+перліт в разі змочування обох сипких матеріалів.

Всі компоненти систем на основі сипких пористих матеріалів є термічно стійкими. В умовах гасіння з ними не відбувається ні яких суттєвих візуально спостерігаємих змін. В деяких випадках фіксувалося розтріскування невеликої кількості гранул ПС. Спучені перліт і вермікуліт подаються на поверхню шара ПС і на них діє менший термічний вплив ніж на ПС. Ці факти вказують на принципову можливість багаторазового використання всіх сипких компонентів вогнегасної системи. Для підтвердження цієї можливості було проведено відповідні дослідження. Такі дослідження було проведено для систем ПС+перліт і ПС+перліт+вода.

В кожному дослідженні з процесу гасіння лабораторного модельного вогнища класу «В» визначались маси ПС і перліту які подано на гасіння. Після кожного гасіння сипкі матеріали висушувались та просіювались крізь сита з різними отворами і зважувались. При цьому було встановлено що втрати ПС не перевищували 4 %, а перліту 1,5 %.

Другім етапом досліджень було повторне використання ПС і перліту для гасіння ацетону. Ці досліді вказали на повний збіг результатів первинного і повторного використання сипких матеріалів при гасінні ацетону. Такі самі результати було отримано і вразі третього і четвертого використання сипких матеріалів. Причому такі результати були отримані як з сухими так і змоченими матеріалами. Ці результати вказують на можливість багаторазового використання сипких речовин для гасіння ацетону.

5.3. Оцінка комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння на основі сипких матеріалів

В роботі [21] запропоновано для оцінки ефективності вогнегасних засобів використовувати комплексний параметр ефективності (Еф):

$$\text{Еф} = \frac{\text{результат}}{\text{вартість}} = \text{Еф1} + \text{Еф2} + \text{Еф3} + \text{Еф4} + \text{Еф5} + \text{Еф6} + \text{Еф7}. \quad (4)$$

За результат прийнято факт гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В». Економічний параметр «ефективність» включає сім складових:

Еф1 – вартість вогнегасних речовин (ВР);

Еф2 – витрати на зберігання ВР;

Еф3 – витрати на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;

Еф4 – витрати на обладнання та його експлуатацію;

Еф5 – складова пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;

Еф6 – витрати на компенсацію збитків від процесу гасіння;

Еф7 – витрати на компенсацію екологічної шкоди від ВР.

Табл. 5. Складові комплексного показника вогнегасної ефективності (Еф1– Еф 7) та сумарне Еф

Складові комплексного показника вогнегасної ефективності	Вогнегасна система					
	ПМП	ПШТ	ПС+гель	ПС+перліт	ПС+перліт+вода	ПС++вода
Еф1 бали	4	3,5	1,6	1,9	2,8	3
Еф2 бали	2,3	1,5	1,8	3,7	3,4	3,7
Еф3 бали	2,2	1,7	2,5	4	3,8	4
Еф4 бали	3,0	2,0	1,4	3,0	2,7	3,6
Еф5 бали	2,2	2,4	3,0	3,8	3,2	3,8
Еф6 бали	1,2	1,5	2,8	4,0	3,3	3,3
Еф7 бали	1,6	1,6	2,6	4,0	4	4
Еф бали	16,5	14,2	15,7	24,4	23,2	25,4

Кожна складова оцінювалась за чотирьохбальною шкалою методом експертних оцінок:

1 – низьке значення;

2 – середнє значення;

3 – високе значення;

4 – дуже високе значення.

В табл. 5 наведені середні результати для кожної складової комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу та сумарне значення загального параметру ефективності, які отримані для ПМП, пін швидкого твердіння (ПШТ) [23] та систем ПС+гель, ПС + перліт і ПС + перліт + вода.

З наведених в табл. 5 результатів можна зробити висновок, що найбільш чисельні значення комплексного показника вогнегасної ефективності мають системи ПС+вода, ПС+перліт і ПС+перліт+вода. Причому основна перевага цих систем забезпечена за такими складовими: витратами на їх зберігання; витратами на

переробку або утилізацію вогнегасної речовини після закінчення строку їх зберігання; відсутністю обмежень на інтенсивність подавання вогнегасних речовин вище критичної; витратами на компенсацію збитків від процесу гасіння та витратами на компенсацію екологічної шкоди.

6. Обговорення результатів визначення вогнегасних характеристик сипких матеріалів

Аналіз експериментальних результатів дозволяє констатувати, що змочування перліту і вермікулиту дає можливість зменшити витрати сипких матеріалів на гасіння як ацетону так і бензину. Це свідчить про те, що змочування дрібних сипких матеріалів сприяє підвищенню їх ізолюючих властивостей завдяки заповненню водою порожнин між гранулами перліту і вермікулиту. На відміну від ПС, останні складаються з гранул меншого розміру, і порожнини між ними також мають менші розміри. Це призводить до перекривання поверхневих шарів води, яка змочує ці матеріали, і до повного заповнення порожнин між гранулами водою. У ПС порожнини між гранулами мають більші розміри, що унеможливорює перекривання водяних шарів на поверхні матеріалу та, відповідно, не дозволяє воді повністю заповнити порожнини між гранулами.

Змочування ПС без додаткового нанесення перліту або вермікулиту суттєво підвищує його вогнегасні характеристики по відношенню ацетону. Цей факт можна пояснити тим, що вода абсорбує пари ацетону. Це приводить до зменшення їх концентрації в зоні горіння що забезпечує припинення горіння. В той же самий час змочування ПС не викликає підвищення вогнегасних характеристик в разі гасіння бензину, що пояснюється відсутності абсорбції парів бензину водою.

Також, аналіз отриманих результатів дає змогу зробити висновок про перевагу шару спученого перліту по зрівнянню зі спученим вермікулітом. Це можна пояснити більшою насипною щільністю вермікулиту та його меншими ізолюючими властивостями.

Порівняння вогнегасних властивостей засобів на основі сипких матеріалів вказує на їх перевагу по зрівнянню з існуючими пінними засобами пожежогасіння за стійкістю та екологічними і економічними характеристиками. Запропоновані засоби пожежогасіння також мають суттєву перевагу за екологічними характеристиками по зрівнянню з засобами пожежогасіння в яких сумісно використовуються ПС і гелеутворюючі системи.

Вогнегасна система, що використовує легкі сипкі матеріали, має переваги в порівнянні з пінами швидкого твердіння за стійкістю та екологічними характеристиками. Високі екологічні характеристики вогнегасних систем на основі сипких матеріалів обумовлено тим, що її компоненти не токсичні, термічно стійкі, не розчиняються у горючих рідинах.

Однією з суттєвих загальних переваг вогнегасних систем на основі сипких матеріалів є відсутність обмежень за інтенсивності їх подавання на поверхню рідин, що горять. Це обумовлено їх термічною стійкістю. Формування вогнегасного шару для таких систем практично не обмежено часом. Це, у свою чергу, дає змогу використовувати малі витрати на засобах подавання сипких матеріалів, що приводить до меншим фінансовим витратам.

Високі економічні характеристики системи піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода обумовлені малими фінансовими витратами на вогнегасні речовини, легкістю їх зберігання, можливістю багаторазового використання, малими витратами на компенсацію збитків від процесу гасіння та компенсацію екологічної

шкоди від вогнегасних речовин.

Експериментальні дослідження проводилися на малорозмірних модельних вогнищах пожежі класу «В». Однак умови горіння та витрати вогнегасних речовин значною мірою залежать від розмірів вогнища. Тому кількісні характеристики вогнегасної здатності, отримані на малорозмірних вогнищах, потребують уточнення при застосуванні до вогнищ більших розмірів.

В рамках розвитку концепції комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння треба переходити від бальної системи оцінки цього економічного параметру до грошової. Для цього потрібне залучення відповідних фахівців.

Для впровадження в практику пожежогасіння полярних рідин вогнегасних засобів на основі сипких матеріалів необхідно провести додаткові дослідження щодо їх ефективності при гасінні різних полярних рідин.

7. Висновки

1. Для нижнього шару вогнегасної системи на основі сипких матеріалів обрано гранульоване піноскло з розміром гранул 10–15 мм, а для верхнього шару спучений перліт з розміром кулеподібних гранул діаметром 1–1,5 мм і спучений пластинчастий вермікуліт з лінійним розміром пластинок 1×2 мм.

2. Експериментально визначені насипна густина, вологоутримання, здатність заповнювати порожнечі нижнього шару, частка матеріалу, що просипалась крізь нижній шар піноскла і плавучість в ацетоні обраних сипких матеріалів підтвердили можливість використання цих матеріалів для гасіння ацетону. Встановлено, що найбільшу плавучість має піноскло – 50 %, а найбільший вологоутримання спучений вермікуліт 49 %. Експериментально визначені висоти вогнегасних шарів систем на основі сипких матеріалів потрібних для гасіння ацетону. Найкращі результати показали змочені матеріали: піноскло – 6,5 см, піноскло (5,5 см)+перліт (1 см). Проведені дослідження підтвердили можливість багаторазового використання сипких матеріалів, зокрема піноскла та перліту, у системах гасіння ацетону. Втрати цих матеріалів після кожного використання не перевищували 4 % для піноскла та 1,5 % для перліту, що свідчить про їх високу ефективність та економічність у застосуванні.

3. На основі проведеної методом експертних оцінок комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння для обраних вогнегасних систем при гасінні ацетону найкращий результат показало змочене піноскло 25,4. Для систем на основі сипких матеріалів піноскло+перліт і піноскло+перліт+вода цей показник склав 24,4 і 23,2 відповідно. Для повітряно механічних пін, пін швидкого твердіння і систем за участю гелів комплексний параметр ефективності склав 16,5; 14,2 і 15,7 відповідно.

Література

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 44 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>
2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 2018. 41 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>

3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. European committee for standardization, 2018. 59 p. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>

4. Боровиков В. О., Чеповський В. О., Слущка О. М. Рекомендації щодо гасіння пожеж у спиртосховищах, що містять етиловий спирт. МНС України. К.:УкрНДІПБ, 2009. 76 с.

5. Ivanković T. Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rad. Toksikol. 2010. Vol. 61. № 1. P. 95–110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943

6. Olkowska E. Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev. 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

7. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research. 2018. Vol. 37. № 1. P. 63–77. URL: http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/9380/1/Poll%20Res-10_proof.pdf

8. Трегубов Д. Г., Дадашов І. Ф., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин: навч. посіб. Х.: НУЦЗУ, 2023. 229 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/ФХОПРпрепрінт.pdf>

9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. 6(10(90)). P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

10. Semko A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland). 2017. Vol. 3. P. 655–664. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>

11. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2. № 10–92. P. 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

12. Vambol S., Bogdanov I., Vambol V., Suchikova Y., Kondratenko O., Hurenko O., Onishchenko S. Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3. № 5–87. P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

13. Chernukha A., Teslenko A., Kovalov P., Bezuglov O. Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

14. Vasilchenko A., Otrosh Y., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230. P. 02036. doi: 10.1051/matecconf/201823002036

15. Kustov M., Kalugin V., Tutunik V., Tarakhno O. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

16. Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими

системами. Харків, 2021. 240 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>

17. Макаренко В. С., Кіреєв О. О., Трегубов Д. Г., Чиркіна М. А. Дослідження вогнегасних властивостей бінарних шарів легких пористих матеріалів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. Вип. 1(33). С. 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

18. Wang Hao, Chen Ziwei, Ji Ru, Liu Lili, Wang Xidong. Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceramics International*. 2018. 44(12). P. 13681–13688. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.207. S2CID 139498288

19. U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 2022. 202 p. doi: 10.3133/mcs2022

20. Makarenko V., Kireev A., Slepuzhnikov Y., Hovalenkov S. Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 954. P. 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

21. Кіреєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Слепужніков Є. Д., Черкашин О. В. Вибір найбільш ефективного засобу гасіння легкозаймистих рідин. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 2(40). С. 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3

22. Бабашов І. Б., Дадашов І. Ф., Кіреєв О. О., Савченко О. В., Мусаєв М. Є. Результати визначення вогнегасних характеристик легких сипких матеріалів при гасінні етанолу. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 250–263. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17964/1/18.pdf>

23. Mahammad E., Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh. Khudiyev. Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*. 2024. Vol. 25. № 2. P. 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

A. Kireev, DSc, Professor, Professor of the Department

Yu. Hapon, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

M. Chyrkina-Kharlamova, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

V. Nuianzin, PhD, Associate Professor, Head of the Department

A. Maiboroda, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

FIRE EXTINGUISHING EFFICIENCY OF LIGHTWEIGHT BULK MATERIALS WHEN EXTINGUISHING ACETONE

Experimental studies of the fire extinguishing ability of systems based on bulk porous materials during acetone extinguishing were carried out. For this purpose, the experimental methodology for determining the fire extinguishing properties of such extinguishing agents, which was previously proposed for ethanol, was chosen. Crushed foam glass, granulated swollen perlite, and vermiculite were selected as bulk materials. As the bottom layer, which ensures the buoyancy of the fire extinguishing system, granular foam glass with a granule size of 10-15 mm was used. As the upper layer, which provides high insulating properties, we consider swollen perlite with a size of spherical granules with a diameter of 1-1.5 mm and swollen lamellar vermiculite with a linear size of 1×2 mm. The buoyancy of the selected bulk materials in acetone, their bulk density and moisture retention were experimentally determined. On the basis of the experimental results, the heights of the layers of dry and wetted bulk materials required for acetone extinguishing were calculated. It was found that the wetting of bulk materials leads to a significant increase in their extinguishing properties. This fact is explained by two factors: an increase in the insulating properties of perlite and vermiculite due to filling the voids between the perlite and vermiculite granules and a decrease in the concentration of acetone vapour due to its absorption by water. The introduction of water also increases the cooling properties of the fire extinguishing system. The lowest heights of fire extinguishing layers during acetone extinguishing are provided by the systems: wetted foam glass – 6.5 cm and

foam glass (5.5 cm)+perlite (1 cm)+water. An expert evaluation of the complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents for the selected fire extinguishing systems when extinguishing acetone was carried out. The best result was shown by wetted foam glass. Further directions of research on the fire extinguishing characteristics of systems based on bulk porous materials and methods for establishing a complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents are outlined.

Keywords: acetone, vermiculite, fire extinguishing ability, crushed foam glass, perlite, swollen bulk materials

References

1. EN 1568-1:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 44 . URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018>
2. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization, 41. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018>
3. EN 1568-3:2018. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible. European committee for standardization, 59. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018>
4. Borovykov, V. O., Chepovskyi, V. O., Slutska, O. M. (2009). Rekomendatsii shchodo hasinnia pozhezh u spyrtoskhovyshchakh, shcho mistiat etylovyi spyrt. MNS Ukrainy. K.:UkrNDIPB, 76.
5. Ivanković, T. (2010). Surfactants in the environment. Arh. Hig. Rad. Toksikol, 61, 1, 95–110. doi: 10.2478/10004-1254-61-2010-1943
6. Olkowska, E. (2011). Analytics of surfactants in the environment: problems and challenges. Chem. Rev, 111, 9, 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g
7. Dadashov, I., Loboichenko, V., Kireev, A. (2018). Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. Pollution Research, 37, 1, 63–77. Available at: http://29yjmo6.257.cz/bitstream/123456789/9380/1/Poll%20Res-10_proof.pdf
8. Trehubov, D. H., Dadashov, I. F., Minska, N. V., Hapon, Yu. K., Chyrkina-Kharlamova, M. A. (2023). Fyzyko-khimichni osnovy rozvytku ta hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn: navch. posib. Kh.: NUTsZU, 229. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/ФХОППрепринт.pdf>
9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(90)), 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504
10. Semko, A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. (2017). The usage of high speed impulse liquid jets for putting out gas blowouts. Journal of Theoretical and Applied Mechanics (Poland), 3, 655–664. Available at: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84938701022&partnerID=40&md5=7bb1aef5a447873de21f8e81c67eedd0>
11. Dubinin, D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

12. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., Onishchenko, S. (2017). Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3, 5–87, 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039
13. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovalov, P., Bezuglov, O. (2020). Mathematical Modeling of Fire-Proof Efficiency of Coatings Based on Silicate Composition. *Materials Science Forum*, 1006, 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70
14. Vasilchenko, A., Otrosh, Y., Adamenko, N., Doronin, E., Kovalov, A. (2018). Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. *MATEC Web of Conferences*, 230, 02036. doi: 10.1051/mateconf/201823002036
15. Kustov, M., Kalugin, V., Tutunik, V., Tarakhno, O. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
16. Dadashov, I. F., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). Hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuiuchymy systemamy. Kharkiv, 240. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033>
17. Makarenko, V. S., Kirieiev, O. O., Trehubov, D. H., Chyrkina, M. A. (2021). Doslidzhennia vohnehasnykh vlastyvostei binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(33), 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18
18. Wang, Hao, Chen, Ziwei, Ji, Ru, Liu, Lili, Wang, Xidong. (2018). Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceramics International*, 44(12), 13681–13688. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.04.207. S2CID 139498288
19. U.S. Geological Survey. (2022). Mineral commodity summaries 2022: U.S. Geological Survey, 202. doi: 10.3133/mcs2022
20. Makarenko, V., Kireev, A., Slepuzhnikov, Y., Hovalenkov, S. (2023). Properties of multi-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. *Key Engineering Materials*, 954, 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx
21. Kirieiev, O., Hapon, Yu., Chyrkina-Kharlamova, M., Slepuzhnikov, Ye., Cherkashyn, O. (2024). Vybir naibilsh efektyvnoho zasobu hasinnia lehkozaimystykh ridyn. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 2(40), 30–43. doi: 10.52363/2524-0226-2024-40-3
22. Babashov, I., Dadashov, I., Kirieiev, O., Savchenko, O., Musaiev, M. (2023). Rezultaty vyznachennia vohnehasnykh kharakterystyk lehkykh sypkykh materialiv pry hasinni etanolu. *Problemy nadzvychainykh sytuatsii*, 1(37), 250–263. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17964/1/18.pdf>
23. Mahammad, E., Musayev, Ilgar F. Dadashov, Alexander A. Kireev, Rza Kh. Khudiyev. (2024). Research fire extinguishing and insulating characteristics of fast-hardening foams. *Processes of Petrochemistry and Oil Refining*, 25, 2, 567–577. doi: 10.62972/1726-4685.2024.2567

Надійшла до редколегії: 24.02.2025

Прийнята до друку: 18.04.2025

УДК 614.84

Д. Г. Трегубов, к.т.н., доцент, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1821-822X)
Л. М. Трефілова, д.т.н., професор, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8939-6491)
О. М. Даник, ст. викл. каф. (ORCID 0009-0003-6849-3403)
К. О. Русенко, викл. каф. (ORCID 0009-0009-4866-6032)
В. С. Мазуров, курсант (ORCID 0009-0009-0415-7834)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДОСВІДУ ПОЖЕЖОГАСІННЯ У ТЕХНОЛОГІЇ МОКРОГО ГАСІННЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОКСУ

Вдосконалено технологію мокрого гасіння металургійного коксу. Проведено порівняння ефективності, економічності та екологічності процесів охолодження коксу після видачі з печі шляхом мокрого та сухого способів. Проаналізовано подібність цих процесів до водяного пожежогасіння та гасіння пожеж негорючими газами. Акцентовано увагу на перевагах та недоліках мокрого гасіння та доцільності вдосконалення даної технології. Аргументовано, що одностадійне гасіння коксу має значні термічні напруження у шматку внаслідок значного перевищення температури середини шматка над температурою поверхні, що водночас знижує ефективність знешкодження домішок стічних вод на поверхні коксу. Показано теоретичну можливість підвищення ефективності утилізації стічних вод за допомогою мокрого гасіння, зменшення витрати води, підвищення якості коксу як важливого компонента доменного процесу, зменшення області токсичної загазованості біля башти гасіння. Встановлено, що даний комплекс питань можна вирішити шляхом добору етапності подавання води на гасіння в імпульсному режимі, який може забезпечити рівномірність процесу охолодження шматка коксу. Розраховано теоретичне значення охолоджуючої здатності води за умов стандартного одностадійного мокрого гасіння коксу та за умов повного використання цієї здатності. Показано, що ефективність використання води як охолоджуючого засобу збільшується за умови її повного випаровування та нагрівання пари до температури коксу. За проведеною оцінкою час подавання та витрата води за повного використання її охолоджуючої здатності скорочуються у 7,5 разів. Запропоновано проводити мокре гасіння у 3 етапи: на 1 хв – концентрованою стічною водою, на 2 хв – розбавленою з ліквідацією цих вод, на 3 хв – технічною водою. Розроблено систему інтервалів імпульсного режиму подавання води на охолодження коксу зі схемою «подавання-пауза» з загальним часом гасіння 219 с, з яких загальний час подавання води – 19 с.

Ключові слова: металургійний кокс, гетерогенне горіння, мокре гасіння, стічна вода, імпульсне розпилення, утилізація

1. Вступ

Однією з найбільш вагомих галузей промисловості України є металургійна, яка базується на коксохімічному виробництві. Кокс використовують як відновник під час виготовлення чавуну та феросплавів, у ливарній технології, у якості сировини для виробництва карбіду кальцію тощо. За технологією кокс отримують шляхом нагріву деяких марок вугілля або скомпонованих з різних видів вугілля шихт протягом 16–17 годин з досягненням температури 1050 °С [1]. Після цього готовий коксовий пиріг виштовхують з печі. При цьому розпечений карбоновий залишок набуває контакт з повітрям і починає інтенсивно горіти, що потребує заходів гасіння. Аналогічна проблема має місце під час завершення гасіння пожеж класу А1 з наявністю осередків тління, яку вирішують шляхом подавання достатньої кількості води або води зі змочувачем для ефективного охолодження як поверхні, так і внутрішніх шарів матеріалу до температури, за якої самопідтримуване горіння карбонізованих матеріалів вже не відбувається [2]. Схожим чином поступають і у технології коксування, за якою розжарений кокс виштовхують у гасильний вагон, який пересувають під гасильну вежу і зрошують великою кількістю

води з охолодженням до 250 °С, що забезпечує відсутність самозаймання на рампі, де завершують охолодження та підсушування коксу [3]. Для гасіння застосовують розбавлену стічну воду, що дозволяє знешкоджувати її домішки та зменшувати об'єм. Але таке гасіння має технологічні, економічні та екологічні недоліки: зниження міцності крупнозернистого коксу, додаткові витрати тепла на випаровування вологи у доменному процесі, втрата тепла коксування, витрата технічної води, корозія гасильного вагону та конструкцій, забруднення довкілля компонентами пароповітряної хмари, що утворюється під час мокрого гасіння.

Існують інші шляхи впливу на процес горіння. Так, у практиці запобігання та припинення горіння використовують флегматизацію горючих середовищ негорючими газовими системами [2, 4]. Такий підхід використано в установках сухого гасіння коксу, що усуває частку недоліків мокрого гасіння [1, 5]. Установка дозволяє охолоджувати кокс, не допускати його горіння та забезпечує рекуперацію тепла. Розжарений кокс містить до 1550 МДж тепла на 1 т вихідної шихти, що аналогічно спалюванню 53 кг умовного палива. Але капіталовкладення у таку технологію повертаються через строк до 8 років, на заводі залишають працездатну установку мокрого гасіння як резервну, ревізія котла-утилізатора займає 1 місяць протягом року, на очищення підлягають більші кількості води з більшою концентрацією забруднень, утворення негорючого газу під час кожного запуску установки здійснюється подачею повітря, що призводить до згоряння близько 3 % коксу, в атмосферу викидаються коксовий пил та парникові гази (за нормами – не більше 1500 мг/м³; в перспективі – 250 мг/м³), необхідність рампи зберігається для висушування від пірогенетичної вологи.

Тому у науково-практичній площині залишається інтерес до розвитку технології мокрого гасіння металургійного коксу як способу знешкодження та утилізації стічних вод з наявністю можливостей для рекуперації тепла та покращення інших показників процесу.

Таким чином, залишається остаточно не вирішеною проблема у технології отримання металургійного коксу здійснення ефективного, економічного та екологічного гасіння розжареного продукту після його видачі з печі.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасна технологія гасіння металургійного коксу полягає в одностадійному проливанні водою розжареного «пирога» з температурою близько 1000 °С для охолодження і можливості формування готової товарної продукції [1, 3]. Для цього, як правило, подають стічні фенольно-аміачні води заводу, що зменшує їх кількість на 30 % та полегшує роботу систем водоочищення для оборотного водопостачання або скидання у водойми. Для захисту довкілля від забруднень стічної води та запобігання утворення на поверхнях шматків коксу плівки важких органічних сполук стічні води попередньо очищують від смол, масел, нафталіну та розбавляють технічною водою. У повітря потрапляє як частина домішок, що містять стоки, так і шкідливі речовини, які синтезуються на розжареному коксі. Забруднена хмара за певних умов може поширюватися на багато кілометрів та виходити за межі санітарної зони. Проблемами, які потребують вирішування також є корозійний вплив водяної пари та деяких домішок на гасильні вагон і башту, зниження міцності коксу за умов термічних напружень, погіршення ефективності доменного процесу внаслідок зволоження коксу, відсутність рекуперації тепла розжареного коксу, потреба у додаткових витратах чистої води та втрати води з оборотного циклу.

Втрати тепла зумовлені тим, що все тепло коксу йде на нагрів та часткове випаровування води, а тому безповоротно втрачається.

Гасіння та охолодження коксу водою здійснюють у гасильній башті, куди розташовують спеціальний гасильний вагон з розжареним коксом щойно виданого «коксового пирога». Зрошування водою через систему рівномірно розташованих форсунок проводять протягом до 90 с з наступним відстоюванням вагону для стікання води до 100 с. З огляду на те, що на коксохімічному заводі працюють водночас десятки камер коксування, які синхронизовано на почерговий вихід на готовність, гасильна башта працює безперервно і часові рамки є строго обмеженими. Витрата води на процес гасіння досягає 5 м^3 на 1 т отриманого товарного коксу, при цьому близько $0,5 \text{ м}^3$ (до 12 %) води втрачається у вигляді пари. Під гасильною баштою формується сток з температурою близько 45°C . Цю воду після відстоювання від дрібнодисперсних частинок коксу, доповнюють технічною та очищеною стічною водою знов застосовують для наступного гасіння. Кокс з температурою 250°C розсипають на рампу – широкий похилий майданчик, де додатково зрошують технічною водою, іноді в ручному режимі проливають осередки самозаймання та витримують для висушування близько 20 хв. При цьому у коксі залишається переважно адсорбована волога у кількості до 1 %.

Для мокрого гасіння частіше змішують стічну і технічну воду з добавками проти корозії [6], тоді на гасіння поступає вода з вмістом домішок до наступних концентрацій, г/дм^3 : сульфати – 8,8; летучий аміак – 0,34, зв'язаний – 2,6; хлориди (за Cl) – 4,4; тіоціанати – 1,2; ціаніди – 0,2, феноли – 0,8. Після гасіння концентрація летучого аміаку у воді знижується у 5 разів, сірководню – у 10, фенолів – у 6. Поки кокс залишається розжареним на його поверхнях піддається окисненню або розкладається до 60 % фенолів вихідної розбавленої січної води, 5 % залишається у її складі, інша (35 %) – потрапляє у повітря у вигляді забруднення, коли поверхня коксу вже частково охолонула для другої частини води цей розподіл змінюється: 10 % – знешкоджується, 40 % – переходить у новий склад стічної води, 50 % – забруднює повітря. З хмари протягом її поширення та остигання формуються опади, які впливають на конструкції, будівлі та рослинність. Тому вміст домішок у воді для гасіння обмежується такими концентраціями, мг/дм^3 : смоли та масла – 100, феноли – 150, тіоціанати – 100, сірководень – 10, вода має бути вільна від лугів, солей хлорвмісних кислот. Вимога стосовно смол та масел визначається тим, що вони за потрапляння у повітря створюють задушливу атмосферу, що може призвести до угоряння людей. Стічні води після мокрого гасіння коксу не придатні для зливу у водойми.

Означений стан питання охолодження коксу зумовив потребу розробки альтернативних технологічних рішень, які розвивалися у напрямках етапного гасіння водою, сухого гасіння негорючими газами [7], а також – через технологію середньотемпературного коксу [8, 9], яка не потребує мокрого гасіння, але інший стан коксу передбачає переобладнання під нього металургійного виробництва, що на даний час мало реально.

За технологією сухого гасіння кокс перевантажують з гасильного вагона у закриту футеровану камеру, де обдувають оборотними газами, які утворюються під час реакції коксу з повітрям камери в момент запуску установки: CO_2 , CO, N_2 . У подальшому ця суміш за умов контакту з коксом нагрівається з 200 до 800°C , а кокс остигає до 250°C . Нагріті гази направляють для вироблення електроенергії у парові котли-утилізатори, у яких утворюється до 40 т/год перегрітої пари з серед-

ньою температурою 450 °С. Гази надалі повертають на новий цикл охолодження нової партії коксу. Такий вплив на кокс підвищує його якість, ефективність коксового і доменного виробництв, і частково знижує забруднення повітря внаслідок відсутності викидів забрудненої пари, товарний кокс виходить з меншою вологістю та більшою міцністю, шихту для коксування можна готувати з менш спікливого вугілля. Але, як вже було сказано, складна технологія має низьку окупність, щорічні періоди простою для технічного обслуговування, загострюється проблема очищення стічних вод, втрачається близько 3 % внаслідок вигорання, технологія потребує очищення газових викидів від коксового пилу, утворюються парникові газу тощо.

Викладене вище зумовлює необхідність продовження пошуків шляхів для підвищення ефективності та екологічності мокрого гасіння коксу. Близькі проблеми має і вдосконалення гасіння пожеж класу А, особливо у напрямку зменшення витрат води на гасіння та відповідних побічних збитків [10]; означену проблему часто вирішують імпульсним подаванням води на пожежогасіння. Завдання, які підлягають вирішенню для покращення мокрого гасіння коксу наступні: запобігти поширенню пароповітряної хмари поза гасильної башти для усунення корозії навколишніх конструкцій, а також небезпечних речовин та запахів, рекуперація тепла коксу, збереження міцності коксу, отримання коксу після гасіння з меншою вологістю, зменшення витрати та втрат технічної води, зменшення забруднення атмосфери коксовим пилом, домішками стічних вод та синтезованими під час гасіння шкідливими речовинами, зменшення часу технологічних операцій усього циклу охолодження коксу, конденсація усієї пари для повернення води в оборотний цикл.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої наукової проблеми є недосконалий режим мокрого гасіння металургійного коксу, що знижує якість продукту та веде до поширення забруднень. Для вирішення цього питання можна скористатись досвідом вдосконалення систем пожежогасіння [2].

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка імпульсного режиму мокрого гасіння металургійного коксу з меншими витратами води загалом та технічної зокрема, підвищенням ступеню руйнування домішок стічних вод, отриманням коксу з більшою міцністю та меншою вологістю.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення наступних завдань:

- визначити механізми руйнування домішок стічної води під час мокрого гасіння коксу;
- розробити режими імпульсного подавання води на мокре гасіння коксу з формуванням менших термічних напружень у шматку коксу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є гасіння розжареного металургійного коксу.

Предметом дослідження є часові параметри імпульсного режиму охолодження шматка коксу водяними струменями, витрата води на гасіння та показники збільшення глибини процесів деструкції домішок стічної води.

Гіпотезою дослідження є можливість отримання більш міцного та менш вологого коксу, водяного газу для енергетичних цілей, більшої глибини очищення стічної охолоджуючої води, меншого забруднення повітря, меншої витрати води

за рахунок ефективної схеми її імпульсного подавання.

Методом дослідження є розрахункова оцінка періодів подавання води та пауз між ними для забезпечення на момент потрапляння води на поверхню шматка коксу його максимальної температури на основі енергетичних показників охолоджуючої здатності води, які прийнято розраховувати як основу для технологій пожежогасіння струменями води, та залежностей для охолодження шматка коксу.

Дослідженню підлягають: металургійний кокс як об'єкт для плавного охолодження та джерело теплового впливу на компоненти стічної води, стічна вода як витратний компонент, який підлягає економії, як енергоносіє та як джерело забруднень, які підлягають знешкодженню. Під час таких досліджень враховано досвід гасіння пожеж з імпульсним режимом подавання води.

Головним параметром, який підлягає керуванню є температура поверхні шматка коксу. Під час охолодження поверхні зменшується її здатність до ініціювання процесів деструкції компонентів фенольно-аміачної стічної води, тому потрібно провести аналіз можливих процесів термодеструкції, здатності до окиснення та інших хімічних реакцій, які можуть формувати водяний газ та призвести до знешкодження домішок стічних вод, відповідно до температурного діапазону для поверхні коксу під час охолодження. Важливими компонентами стічної води, які підлягають знешкодженню або контролю у газовому просторі та у залишковій воді є: синильна кислота, феноли, зв'язаний аміак, сірководень, тіоціанати, смоли, масла, луи, солі хлорвмісних кислот, а також діоксид сірки.

Другим важливим параметром є зменшення обсягів використання води, у тому числі технічної, за рахунок більшої ефективності використання охолоджуючої здатності води під час імпульсного подавання у шар розжареного коксу. Додатковим параметром, який потребує дотримання, – є часовий регламент роботи гасильної башти та рампи, де відбувається гасіння та охолодження коксу.

5. Визначення механізмів руйнування домішок стічної води під час мокрого гасіння коксу

За принципом знешкодження стічних вод мокре гасіння металургійного коксу можна віднести до термохімічних методів [11]. Проаналізуємо можливі хімічні реакції за умов наявності температур до 1000 °С, карбону металургійного коксу, кисню та азоту повітря, води та водяної пари, органічних та неорганічних домішок стічної фенольної води.

Головними домішками води під час охолодження розжареного коксу фенольним стоком є синильна кислота, зв'язаний аміак, фенол, сірководень. Ці ж речовини, а також діоксид сульфуру, є головними токсичними домішками у складі пари яка викидається в атмосферу. Це свідчить про те, що ступінь повноти процесів термодеструкції та окиснення вказаних речовин під час мокрого гасіння розжареного коксу мала. Але слід зауважити, що початкова температура гарячого коксу 950–1100 °С, наявність повітря та інших реагентів достатні для ініціювання багатьох відповідних процесів. Про їх протікання свідчить й виділення SO₂ та відомі дані з дослідження двоетапного мокрого гасіння коксу (спочатку фенольною, а потім технічною водою) [7]: 60 % фенолів стічної води переходять у склад парової хмари, до 45 % утилізується шляхом деструкції та окиснення на розпечених поверхнях коксу, а до 5 % потрапляє з залишковою водою у відстійники.

Хімічні реакції схожі на процеси протягом мокрого гасіння мають місце й під час зрошення гарячого коксового газу фенольно-аміачною водою. При цьому

відмічають невідповідність між концентрацією фенолів, що потрапляють у повітря після градирні та у конденсаті. Фенолів потрапляє в атмосферу значно менше, ніж у стічну воду, що свідчить про їх парогозове окиснення.

Малі концентрації продуктів розкладання у газовій фазі свідчать про те, що більшу частину часу відбувається контакт води з коксом, який має вже значно охолоджену зовнішню поверхню. За таких умов можливості розжареної поверхні, як джерела тепла для термодеструкції токсичних речовин, використано не повною мірою. Так, вміст тіоціанатів у воді після гасіння збільшується, не зважаючи на те, що температура розкладання тіоціаната калію $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. З цього можна припустити, що більший час контакту води з коксом за умови одностадійного гасіння його поверхня має $t < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На розжареній поверхні коксу можуть протікати процеси розкладання органічних та деяких неорганічних сполук, парогозове окиснення, неінтенсивне рідкофазне окиснення та утворення водяного (генераторного) газу. Інтенсивне рідкофазне окиснення органічних сполук потребує тисків більших за 20 атм. для підвищення розчинності у воді кисню, тому такий процес за умов мокрого гасіння коксу є неможливим.

Під час аналізу комплексу хімічних процесів, які можуть мати місце за умов мокрого гасіння, будемо спиратись на той факт, що концентрації HCN, H_2S та SO_2 у паровій хмарі, що утворюється при гасінні стічною або технічною водою, є приблизно однаковим. Це свідчить про те, що реакції їх утворення визначаються наявністю розжареного коксу, води та повітря, і майже не залежать від вмісту типових домішок в попередньо очищеній стічній воді.

Почнемо аналіз з максимальних температур коксу – $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$. На карбоновій поверхні розжареного коксу за температур $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ за умов подачі води починає утворюватися водяний газ (синтез-газ, генераторний газ) приблизно наступного складу (найбільший вихід водню спостерігається за температур поверхонь $900\text{ }^{\circ}\text{C}$): $\text{CO} - 44\%$, $\text{N}_2 - 6\%$, $\text{CO}_2 - 5\%$, $\text{H}_2 - 45\%$, а також метан, CS_2 , H_2S тощо з основною реакцією: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO} - 132\text{ кДж/моль}$, та вторинною: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$. За умови наявності перегрітої пари температура початку формування водяного газу знижується до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, а активний процес відбувається вже починаючи з $650\text{ }^{\circ}\text{C}$. Приблизна нижня концентраційна межа поширення полум'я водяного газу становить $6,7\%$, а теплота згоряння – 11723 кДж/м^3 , його застосовують як паливо в металургійній, керамічній промисловості, при виготовленні скла, для синтезу аміаку, метанолу тощо. Крім того, під час реакції 1 молу водяної пари з карбоновою поверхнею шматка коксу утворюється 2 молі продуктів реакції, що вже дозволяє виконувати роботу турбіни та отримувати енергію.

Утворення сірководню може бути результатом взаємодії водню зі складу водяного газу з сіркою коксу (шкідлива домішка для металургійного процесу [1], тобто ця реакція надає позитивний ефект) за температур $350\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (інтенсивніше на каталізаторі): $\text{H}_2 + \text{S} = \text{H}_2\text{S}\uparrow$. За більших температур має відбуватись зворотна реакція, якщо сірководень утворився раніше іншими шляхами. Так, можливе протікання реакції з водою водорозчинних сульфідів: $\text{Na}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} + \text{NaOH}$. Парафінові вуглеводні за підвищених температур реагують з сіркою з виділенням сірководню та карбону, який може додаватися до шламу або уноситися з парами води (що і спостерігається при мокрому гасінні). За температур близько $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ сірка може взаємодіяти з карбоном з утворенням сірковуглецю: $2\text{S} + \text{C} = \text{CS}_2$.

Виділення діоксиду сірки може бути результатом окиснення сульфідів заліза

на повітрі за підвищених температур до 800 °C: $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$. Сульфід заліза є первинним продуктом корозії заліза під дією сірководню. Найпростіший шлях утворення SO_2 – високотемпературне окиснення сірки киснем повітря, наприклад, процес згоряння: $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$.

Синильна кислота під час мокрого гасіння може формуватися у режимах рідкофазного окиснення тіоціанатів: $\text{NH}_4\text{SCN} + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NH}_4\text{HSO}_4 + \text{HCN}$. Але відомо, що ця сполука утворюється й при гасінні чистою технічною водою, крім того, вміст тіоціанатів у стічних водах після гасіння збільшується. Тобто, синильна кислота є результатом взаємодії розжареного карбону коксу з водяним (генераторним) газом. Такий процес може відбуватись як реакція аміаку з метаном на повітрі на платиновому каталізаторі: $\text{NH}_3 + \text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 = \text{HCN} + 3\text{H}_2\text{O}$; або без доступу повітря за температур більших за 1050 °C: $\text{NH}_3 + \text{CH}_4 = \text{HCN} + 3\text{H}_2$, але така реакція не встигне суттєво відбутися. Тоді, скоріш за все, якийсь компонент коксу по відношенню до синильної кислоти має каталітичну активність. Тіоціанати здатні до термодеструкції. При перегріві більше за 250 °C KSCN повільно розкладається на сульфід та ціан, останній є трохи менш токсичним ніж HCN та ціаніди: $\text{KSCN} \rightarrow \text{C}_2\text{N}_2 + \text{K}_2\text{S}$. За доступу повітря та можливості згоряння ціан реагує з утворенням не токсичних продуктів: $\text{C}_2\text{N}_2 + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{N}_2$.

Температура початку розкладання тіоціаната амонію – 170 °C, тіоціаната натрію – 307 °C. Але оскільки після мокрого гасіння вміст тіоціанатів у стоці збільшується, можна припустити, що ці реакції відбуваються не інтенсивно.

Парогазове окиснення фенолів потребує температур більших за 800 °C, але за умов наявності каталізаторів (платина, паладій, міднооксидні каталізатори) ця межа знижується до 350 °C: $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH} + 14\text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2\text{O} + 6\text{CO}_2 + 14\text{H}_2$. Низькотемпературна взаємодія з киснем фенолів відбувається за схемою [12, 13]: вони гідроксильюються, утворюють хінони, карбонові оксіхінони, гумінові кислоти, пероксидні сполуки, аж до CO_2 і H_2O .

Таким чином, температура карбонової поверхні розжареного коксу може ініціювати низку реакцій за участю домішок стічної води, що забезпечить їх утилізацію та зменшить забруднення як повітряного навколишнього простору, так і залишку стічної води, яка не встигла випаруватись на гарячому коксі. Але протікання багатьох з наведених реакцій вимагає наявності високих температур.

6. Розробка режиму імпульсного подавання води на мокре гасіння коксу

Напрямом вдосконалення стандартної технологією мокрого гасіння металургійного коксу с (рис. 1, крива 3) є використання режиму послідовного подавання стічної, а потім технічної води, що впроваджують без конструктивних змін установки гасіння [7]. За таких умов зафіксовано зростання міцності крупнозернистого коксу, зменшення вмісту сірки та формування шламу. На гасіння 630 кг розжареного коксу витрачається 945 л води, з них фенольно-аміачного стоку 160 л, з яких 315 л переходить у пару, тобто 33 %. Технічну воду подавали через 40 с. У відстійнику після завершення гасіння формується стічна вода нового складу, яка містить 3 % вихідної кількості фенолів та 6 % сполук аміаку.

Якщо період подавання води становить до 2 с, то її охолоджуючої здатності вистачає лише для охолодження поверхні, при цьому більша частина води випаровує. Наявні дослідні дані показують [7], що для забезпечення рівномірного зниження температури шматка коксу загальна тривалість подавання води протягом 1 хв має становити близько 27 с. При цьому перша порція води має подава-

тися протягом 15 с. Тоді для загальної тривалості гасіння 2,5 хв досліджено наступну схему охолодження у режимі «подача-пауза» подавання, с: 20–15, 16–15, 16–17, 16–25, 10–30. За такого режиму загальний час подавання води склав 78 с (рис. 1, крива 2а). За наведеними залежностями температура поверхні у період пауз майже не встигала зростати за рахунок внутрішнього запасу тепла, що свідчить про відсутність інтенсивного окиснення коксу. Але дана система охолодження водою не враховує бажані режими руйнування забруднень стічної води, а передбачає лише вирівнювання температур по об'єму шматка коксу.

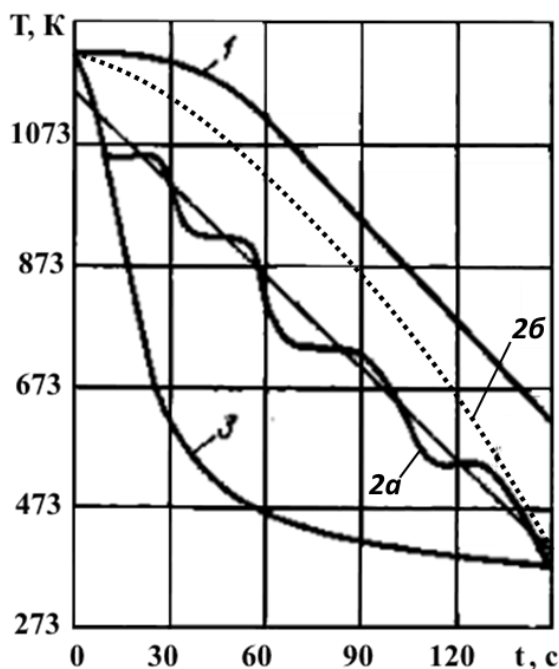


Рис. 1. Зміна температури поверхні та середини шматка коксу за умов мокрого гасіння: 1 – у центрі шматка, 2 – на поверхні при імпульсному подаванні води, 3 – на поверхні при одностадійному подаванні води, 2а – стандартний режим, 2б – запропонований режим

За даними (рис. 1) можна побачити, що інтенсивність охолодження поверхні шматка коксу за одностадійного подавання води значно більша, ніж за технології імпульсного гасіння, хоча зміна температури серцевини шматка має близьку залежність. Але в умовах імпульсного подавання час взаємодії води з поверхнею коксу, а також час для відстоювання гасильного вагону після завершення подавання води будуть меншими, що компенсує більш тривалий період гасіння. Водночас меншає кількість тріщин у коксі та їх глибина, менше поглинається волога пористістю коксу, оскільки вода не встигає просочувати шматок вглиб, збільшується ступінь руйнування фенолів, досягається зменшена інтенсивність крапельних опадів внаслідок меншого об'єму парогазової хмари за менших витрат води.

Для поверхні шматка коксу можна оцінити характеристики теоретичного стадійно-імпульсного режиму охолодження водою за принципом «подача-пауза», за якого внутрішні шари коксу встигнуть передати накопичене тепло до поверхні шматка і наступний імпульс водяного струменю потрапить на поверхню шматка з максимально можливою усередненою температурою. При цьому існує достатньо малий час контакту розжареної поверхні шматка коксу з водою, за якого внутрішні термічні напруження всередині шматка не перевищують критичних значень.

Припинення подавання води між імпульсами не означає, що у цей проміжок

часу виникне окиснення та вигорання карбонізованої поверхні шматка коксу, оскільки протягом цієї паузи газовий простір гасильного вагону виявляється наповненим негорючою водяною парою, що викликає явище флегматизації процесу горіння [2]. За таких умов можна на певному температурному інтервалі процесу мокрого гасіння коксу сформувати режим охолодження без формування стоку, тобто з повним випаровуванням. З цього приводу необхідно зауважити, що водяна пара теж має охолоджуючу здатність. При цьому час гасіння значно не збільшиться, а витрата води зменшиться.

Пропонуємо змінити тривалість періодів подавання води в кожному імпульсі для наближення залежності зменшення температури поверхні шматка коксу до залежності зменшення температури середини шматка (рис. 1, крива 1). Водночас передбачається у періоди достатньо малих пауз наявність неокисного газового середовища біля поверхонь коксу у вигляді водяного газу або пари води. Для наведеної на рис.1 залежності «2а» наявні температури забезпечують можливість самопідтримування горіння коксу під час перших трьох періодів охолодження, коли температура поверхні шматка перевищує 500 °С, причому внутрішня температура шматка становить близько 700 °С.

З теорії гасіння пожеж різних класів розпиленням та компактним струменем води відомо [2, 14, 15], що для повної реалізації власної охолоджувальної здатності вона має пройти 3 етапи нагрівання, під час яких буде поглинати тепло за рахунок теплоємності рідкого стану в інтервалі температур нагрівання до температури кипіння води, за рахунок теплоти випаровування та теплоємності парового стану води в інтервалі температур нагрівання до температури зони горіння (у випадку мокрого гасіння їй буде відповідати температура поверхні шматка коксу):

$$q_{\text{погл}} = 0,7c_p^{\text{рід}}(80 - t_o) + 0,55\Delta H_{\text{вип}} + 0,4c_p^{\text{пар}}(t_{\text{гор}} - 80), \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

де $c_p^{\text{рід}}$, $c_p^{\text{пар}}$ – масові теплоємності води у рідкому та пароподібному стані, 4,2 та 1,96 кДж/кг К, відповідно; $\Delta H_{\text{вип}}$ – теплота випаровування води, 2260 кДж/кг [16]; 80 °С – середня температура пароутворення; 0,7, 0,55, 0,4 – емпіричні значення часток від загальної кількості води, що повністю приймає участь у даному етапі відбору тепла.

Під час пожежогасіння ставлять завдання максимально повно використовувати ці теплові процеси, оскільки вода, яка не встигла випаруватись та стікає далі використовує власну здатність до поглинання тепла лише на 2–10 %. Тому навіть виявляється гасіння теплою водою більш ефективним, бо вода встигає випаруватись та пройти усі стадії відбору тепла. Для гасіння полум'яного горіння розпиленою водою виявляється, що перша стадія відбору тепла поглинає близько 10 % тепла від отриманої охолоджуючої здатності, друга – близько 50 %, третя – до 40 %.

Якщо під таким кутом зору розглянути процес мокрого гасіння, то середня температура води, що стікає у відстійник становить 45 °С, також приймемо, що вода нагрівається не до 80 °С, а до 100 °С, а пара встигає нагрітись до 300 °С, то охолоджуюча здатність 1 кг води під час стандартного режиму одностадійного мокрого гасіння з врахуванням втрат у вигляді пари 10 % буде становити: $q_{\text{погл}} = 0,9 \cdot 4,2(45 - 20) + 0,1(4,2(100 - 20) + 2260 + 1,96(300 - 100)) = 393,3 \text{ кДж/кг}$ (на підставі залежності (1)), з яких 94,5 кДж/кг надає вода, що протекла у відстійник – 90 % від поданого обсягу. Вода, що встигла перейти у пару, зможе поглинути

265,2 кДж/кг, що становить 67,4 % ефективності води по відношенню до охолодження маси коксу. Водночас максимальна охолоджуюча здатність води без втрат забезпечує поглинання $q_{\text{погл}}=4,2(100-20)+2260+1,96(300-100)=2988,0$ кДж/кг тепла. Відносно такого розрахунку вода під час стандартного одностадійного мокрого гасіння реалізує власну охолоджуючу здатність лише на 13,2 %, при цьому головну частину ефекту охолодження – 75,6 % забезпечує процес випаровування та подальшого нагріву води.

Наведена оцінка показує, що процес подавання стічної води на мокре гасіння коксу необхідно влаштувати таким чином, щоб її максимальна кількість перейшла у пару. Це дозволить зменшити витрату води на гасіння у 7,5 рази. Це означає, що повний час застосування імпульсних струменів також необхідно зменшити у 7,5 рази. Якщо прийняти час одностадійного гасіння водою 120 с, то повний час імпульсного подавання без втрат буде достатнім у кількості 16 с, з втратами – оцінімо як 30 с.

За основу організації імпульсного гасіння водою шматка коксу приймемо достатню умову для охолодження його поверхні, для чого вистачає часу подавання води 1–2 с; близько 5 с буде відновлюватись та усереднюватись температура поверхні за рахунок тепла внутрішніх шарів коксу, а також – зберігатись флегматизуюче середовище в об'ємі гасильного вагону. Але для створення флегматизуючого середовища у всьому об'ємі коксу необхідний або більший час подавання для потрапляння води у нижні шари насипу коксу, або вдосконалити конструкцію вагону для можливості вприскування води у середні та нижні шари насипу.

Перша порція стічної води, що подається на гасіння, спрямована в першу чергу на те, щоб зафлегматизувати об'єм гасильного вагону за рахунок витискання повітря та створення неокисного газового середовища на основі водяної пари та інших газів. За умови рівномірно вприскування води в об'єм купи зі зрошуванням усіх поверхонь мінімальний час імпульсу водяних струменів становить 2 с. Це має зменшити вихідну температуру поверхні шматка коксу 950 °С на 25 °С. Пауза в 10 с передбачає достатність для відсутності загоряння коксу, час на вирівнювання температур в об'ємі шматка коксу, нагрів до максимальної усередненої температури газового середовища. Температура поверхні шматка за рахунок внутрішніх гарячих шарів коксу зростає до температури незначно меншої від початкової. З огляду більшу інтенсивність дифузії для більших температур газів перші паузи між подаванням води можна робити меншими. Тоді режим імпульсного зрошення як «час подавання-пауза» буде наступним, с: 2–5, 2–6, 2–7, 1–8, 1–9, 1–10, 1–11, 1–12, 1–13, 1–14, 1–15. При цьому перші 60 с охолодження здійснюються концентрованою стічною водою, другі 60 с – розбавленою. Таким чином, час подавання води протягом 1-ї хв складе 9 с, 2-ї – 4 с, що обумовлює рівномірне охолодження шматка коксу без виникнення термічних напружень та ліквідування стічної води. Через 2 хв такого режиму подавання води температура поверхні коксу знижується до 450 °С, що достатньо для гарантування відсутності загоряння (але ще залишається можливість самозаймання за накопичення тепла окиснення у купі [2, 14]).

На 3 етапі, коли температура коксу вже не забезпечує руйнування домішок, продовження його імпульсного охолодження здійснюється вже технічною водою протягом 6 циклів за принципом «подача-пауза» за схемою, с: 1–15, що складе 96 с. Тобто загальний час імпульсного гасіння в означеному режимі становить 219 с (3,65 хв), а загальний час подавання води – 19 с (при цьому немає необхідності відстоювання гасильного вагону). Стандартне гасіння з відстоюванням вагону для

стікання води становить до 190 с (3,2 хв), тобто час близький. Надалі кокс за стандартною процедурою скидається з гасильного вагону на рампу для завершення охолодження, контролю випадків самозаймання та для досушування.

7. Обговорення результатів дослідження розробки імпульсного режиму мокрого гасіння металургійного коксу

Проведений аналіз температурних та хімічних умов, а також розрахунок охолоджуючої здатності води під час мокрого гасіння металургійного коксу дозволили розробити схему імпульсного подавання води з більш ефективним її застосуванням за багатьма техніко-екологічними параметрами процесу. А саме – підвищена глибина знешкодження домішок стічної води, яку використовують для гасіння, досягнуто менші термічні напруження у шматку коксу з отриманням більш міцного цільового продукту, досягнуто зменшення витрати води на гасіння, досягнуто зменшення забруднення навколишнього повітряного простору, показано можливість отримання менш вологого коксу, а також – енергетичного ефекту шляхом використання тепла коксу і теплоти згоряння водяного газу, що утворюється на першій стадії запропонованого режиму гасіння. Позитивний результат проведеного дослідження отримано за рахунок добору інтервалів «подавання-пауза» під час зрошування розжареного коксу у гасильному вагоні водою, що забезпечило зміну профілю зменшення температури поверхні шматка коксу.

Обраний підхід на відміну від поширених базувався не лише на завданні зменшити термічні напруження у шматку коксу, а й на забезпеченні за умов подавання води мінімально достатнього флегматизуючого (негорючого) газового середовища в об'ємі гасильного вагону, на сповільненні охолодження поверхні шматку коксу для подовження наявності високотемпературних умов для розкладання домішок стічних вод навіть за їх високих концентрацій, на забезпеченні достатніх пауз між імпульсами подавання води для вирівнювання температури поверхні відносно температури середини шматка. Таким чином, обраний підхід дозволив вирішити завдання з розробки ефективної, економічної та екологічної технології мокрого гасіння металургійного коксу у більш широкому комплексі вимог.

За прийнятою методикою імпульсного мокрого гасіння коксу час подавання води має охолодити поверхню більшості шматків у насипу коксу, але головне – кількість водяної пари, що утворюється повинна зафлегматизувати газовий простір забезпечити відсутність контакту розжареної поверхні коксу з киснем повітря (флегматизуюча концентрація негорючого газу – це така, за якої не підтримується самовільний розвиток горіння [2, 17]). У паузі між імпульсами у шматку коксу має вирівнятися температура, і до цієї ж температури має нагрітися водяна пара для максимальної реалізації охолоджуючої здатності. Тоді наступний імпульс подавання води має затриматись на відповідний час. Тобто потреба у збільшенні стандартних інтервали між імпульсами подавання води визначається часом на її нагрів, випаровування та нагрів пари до максимально можливої температури, що використовується для підвищення ефективності водяного пожежогасіння [14, 18]. Для максимального використання охолоджуючої здатності води її більшу кількість необхідно подавати в середину купи коксу у гасильному вагоні, щоб пара продовжувала грітися та відбирати тепло від коксу. Для цього необхідна модернізація гасильного вагону з можливістю вприскування розпорошеної води у внутрішні шари розжареного коксу через стінки вагону або іншим шляхом. Крім того, таке подавання буде подовжувати шлях водяної пари крізь розжарений кокс, що

буде сприяти нагріву пари до більшої температури та більш повній реалізації охолоджуючої здатності води.

За такого подавання збільшується глибина та ефективність знешкодження забруднень стічної води, виникає можливість подавати на гасіння перші порції без розбавлення технічною водою та повністю ліквідувати масу стоку. Парогазове окиснення фенолів буде тривати за температур поверхні шматка коксу більших за 800 °С. Така умова виконується на 1 етапі, тобто протягом 1-ї хв гасіння та 7 циклів охолодження. Ліквідація стічної води та її домішок за таких умов відбувається з одночасним утворенням за контакту з карбоновою поверхнею коксу горючого водяного газу розширеного складу, який можна використовувати для енергетичних цілей (причому енергетична ефективність буде підвищеною внаслідок гарячого стану газів). За високих температур коксу будуть руйнуватися й смоли та масла, які за у менших температур утворюють на поверхнях шматків коксу плівку, що заважає доменному процесу. Тобто, можна позбутися стадії підготовки стічної води для мокрого гасіння у вигляді очищення від смол та масел.

На 2-му етапі протягом 2-ї хвилини гасіння відбуваються наступні 4 цикли охолодження по 1 с, коли фенол вже окислюється повільно, водяний газ теж вже утворюється не інтенсивно. Тому в цей період можливо подавати лише очищені на біохімічній установці заводу стічні води, які ще не можна скидати у водойми та які потребують доочищення на міських біопрудах. На цьому етапі кокс охолоджується до температури нижче за його температуру самонагрівання, коли гарячий кокс вже не має схильності до самовільного підвищення температури; що відноситься до області температур менших ніж 500 °С. За цей час надходить 1,7 м³ води. При цьому близько 50 % вмісту фенолів переходить у пару. Якщо їх концентрація у воді була 0,15 г/дм³, то у повітря перейде 128 г, проти 3750 г за звичайного гасіння, тобто викид фенолів зменшується приблизно у 30 разів.

Так, якщо вихід коксу з печі становить 13 т, то на його гасіння звичайним методом йде близько 50 м³ води; в імпульсному режимі подавання буде витрачено близько 8 м³ води. З них 4 м³ – є повністю ліквідований обсяг не очищеного стоку, 2 м³ – води після біохімічної установки, змішаної з технічною; 2 м³ – технічної. З 50 м³ води для одностадійного мокрого гасіння у пару переходить близько 6 м³. Якщо вміст стічної та технічної води у суміші був 50/50 %, то у пару перейшло 3 м³ технічної води; її втрати при імпульсному гасінні будуть аналогічними.

Таким чином, розроблена схема імпульсного подавання стічної води на мокре гасіння коксу значно підвищить ступінь деструкції фенолів, повністю ліквідує частину забрудненого стоку та його домішки. За запропонованим режимом подавання води її витрата зменшується у 6,25 рази, досягаються знешкодження стічної води, а втрати технічної води відповідають стандартній методиці гасіння. Для енергетичного використання гарячого водяного газу потрібна технологія його відбору у комплексі з певною енергетичною установкою. Водяний газ, який утворюється, за умови направлення на спалювання у гарячому стані дасть більшу температуру горіння та ефективність парової турбіни у разі його використання для отримання електроенергії.

За відомим досвідом впровадження імпульсного гасіння коксу – нераціонально робити імпульсну подачу за рахунок перемикання двигуна. Пропонуємо систему з керованим клапаном в об'ємі, що знаходиться під тиском.

Результати дослідження необхідно уточнити на повномасштабній установці, що передбачає уточнення тривалості імпульсів подавання води та пауз для підвищення ефективності деструкції домішок стічної води, встановлення концентрацій

домішок, які можна знешкоджувати за розробленого механізму, встановлення зміни елементного складу коксу під час руйнування окремих сполук на його поверхні.

З небезпек розробленої технології необхідно відмітити те, що за утворення водяного газу можливо досягнення його вибухонебезпечних концентрацій у повітрі за відсутності системи відбору, що потребує моніторингу та, можливо системи запобігання запалювання (флегматизація негорючим газом або розбавлення повітрям до негорючого стану). Також відмітимо, що за умови інтенсивного утворення водяного газу буде витрачатися на реакцію частина поверхневого карбону коксу. Тим не менш, саме енергетичне використання водяного газу є перспективним напрямом розвитку даної технології.

Таким чином, розроблена технологія представляє інтерес у багатьох напрямках: підвищення якості коксу внаслідок менших розтріскування, вмісту сірки та вологи (вода менше встигає просочуватись у внутрішні шари шматка), більша ефективність знешкодження стічної води, менше забруднення атмосфери, можливість отримання додаткового енергетичного ефекту за поєднання теплоти розжареного коксу та теплоти згоряння водяного газу.

8. Висновки

1. Визначено основні забруднювачі для стічної води, яка використовується для мокрого гасіння коксу, концентрації яких мають контролюватися у самій воді та у повітряному просторі біля башти гасіння: HCN , $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, H_2S , NH_4^+ , SCN^- , SO_2 (у повітрі). Основними реакціями їх знешкодження є термодеструкція та парогазове окиснення, водночас можливі деякі реакції синтезу, а також горіння коксу. Визначено температурні інтервали для поверхні шматка коксу, у яких відбуваються цільові реакції руйнування домішок стічної води та утворення водяного газу під час мокрого гасіння коксу: вище за 800°C , до 500°C , до 250°C , нижче за 250°C . Визначено 4 відповідні етапи мокрого гасіння коксу: стічною водою, розбавленою стічною водою, технічною водою, завершення гасіння та охолодження на рампі. Перші два етапи дозволяють ліквідувати стічні води та утворювати водяний газ.

2. Встановлено, що для одночасного вирішення двох задач – підвищення ефективності руйнування домішок стічних вод під час мокрого гасіння та зменшення термічних напружень у шматку коксу – необхідно сповільнити процес охолодження поверхні шматка та зменшати інтенсивність перепадів температур, а також обов'язковим завданням залишається забезпечення флегматизації паром води газового середовища у гасильному вагоні біля поверхонь розжареного коксу. Означені завдання вирішено за рахунок розробки наступної схеми імпульсно-періодичного подавання води «подавання-пауза», с: 2–5, 2–6, 2–7, 1–8, 1–9, 1–10, 1–11, 1–12, 1–13, 1–14, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15, 1–15; при цьому 1 хв подається нерозбавлена стічна вода, 1 хв – розбавлена, 1,65 хв – технічна; загальним час гасіння становить 219 с, у тому числі подавання води – 19 с. Досягнуто збільшення міцності коксу, зменшення утворення шламу, зменшення вмісту сірки та вологи.

Література

1. Мирошніченко І. В., Фатенко С. В., Мірошніченко Д. В., Шульга І. В. Розширення сировинної бази коксування та поліпшення властивостей коксу як доменного палива: монографія. Харків–Тернопіль: Крок, 2022. 254 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/6b3cab3a-0be1-4c1e-81f3-6024265bf54e>
2. Трегубов Д., Дадашов І., Мінська Н., Гапон Ю. Чиркіна-Харламова М. Фі-

зико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Харків: НУЦЗ України, 2024. 216 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19111>

3. Shulga I. V., Miroshnichenko I. V., Ryshchenko I. M., Miroshnichenko D. V. Moisture content of wet-quenched coke. *Coke and Chemistry*. 2019. № 62(9). P. 402–407. doi: 10.3103/S1068364X19090084

4. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Шаршанов А. Я. Прогноз ефективності флегматизації горючих систем кисневмісними сумішами. *Проблеми пожежної безпеки*. 2015. № 37. С. 228–234. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3196>

5. Fidchunov A. L., Vasil'ev Yu. S., Fidchunov L. N., Shulga I. V. On coke burnout and productivity of the USTK. *Coal Chemical Journal*. 2016. № 2. С. 8–12. URL: https://www.ukhin.org.ua/images/magazine/2016/2_2016/Journal1-2_2016-2.pdf

6. Kwiecińska A., Figa J., Stelmach S. The Use of Phenolic Wastewater in Coke Production. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016. № 25(2). P. 465–470. doi: 10.15244/pjoes/60725

7. Kolomiichenko A. I., Zolotarev I. V., Mostovoi O. N., Kasyun S. I., Toryanik E. I. Producing Coke of Improved Quality. *Coke and Chemistry*. 2017. № 60. 424–428. doi: 10.3103/S1068364X17110035

8. Карпенко О. О., Лазаренко О. Я., Лазаренко Т. В., Ніколайчук Ю. В. Концепція удосконалення ресурсозберігаючих технологій і технологічного обладнання для виробництва коксу з заданими властивостями. *Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит*. 2012. № 7(101). С. 71–76. URL: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/20409>

9. Strakhov V. M., Kaliakparov A. G., Panfilov V. P. et al. Coke Quality in Medium-Temperature Coking of Fractionated Long-Flame Coal. *Coke and Chemistry*. 2022. № 65. 316–334. doi: 10.3103/S1068364X22080051

10. Скляр І., Пирогов О. Деякі особливості визначення побічних збитків від пожеж. XVI Міжнар. НПК молодих вчених, курсантів та студентів «Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності». Львів: ЛДУ БЖД. 2021. С. 108–109. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14924>

11. Трегубов Д. Г., Пономаренко Р. В., Слепужніков Є. Д., Чиркіна М. А. Режими знешкодження стічних вод мікродуговим розрядом у системі з об'ємним електродом. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій: монографія. Полтава–Львів–Дніпро: Середняк Т. К. 2022. С. 509–519. doi: 10.23939/monograph2022

12. Delort N., Meziane I., Herbinet O., Carstensen H.-H., Battin-Leclerc F. Experimental and modelling study of phenol combustion and oxidation. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2024. № 40. P. 105247. doi: 10.1016/j.proci.2024.105247

13. Maffei L., Pelucchi M., Faravellia T., Cavallotti C. Theoretical study of sensitive reactions in phenol decomposition. *Reaction Chemistry & Engineering*. 2020. № 3. P. 452–472. doi: 10.1039/C9RE00418A

14. Трегубов Д. Г., Мінська Н. В., Гапон Ю. К., Тарахно О. В. Теорія процесів горіння, вибуху та пожежогасіння. Харків: НУЦЗ України, 2024. 422 с. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>

15. Zhun L., Rongwei B., Jiaming Z., Yang Zh. Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. № 13. P. 100402. doi: 10.1016/j.csite.2019.100402

16. PubChem. Compound summary. URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Glassman I., Yetter R. A., Glumac N. G. *Combustion*. London: Elsevier, 2014. 757 p. doi:10.1016/C2011-0-05402-9

18. Христич В., Маляров М., Бондаренко С. Сучасні способи підвищення ефективності гасіння пожежі розпорошеною водою. Проблеми пожежної безпеки. 2016. № 40. С. 201–205. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198>

D. Tregubov, PhD, Associate Professor, Professor of the Department

L. Trefilova, DSc, Senior Researcher, Associate Professor of the Department

O. Danyk, Senior Lecturer of the Department

K. Rusenko, Teacher of the Department

V. Mazurov, Cadet

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

USING FIRE EXTINGUISHING EXPERIENCE IN THE METALLURGICAL COKE WET QUENCHING TECHNOLOGY

The metallurgical coke wet quenching technology was improved. An efficiency comparison, cost-effectiveness and environmental friendliness of coke cooling processes after removal from the furnace using wet and dry methods was carried out. These processes similarity to water fire extinguishing and fire quenching with non-flammable gases was analyzed. Attention is focused on wet quenching advantages and disadvantages and this technology improving feasibility. It is argued that coke single-stage quenching has significant thermal stresses in the lump due to a significant temperature excess in the lump middle over the surface temperature, which at the same time reduces the wastewater impurities neutralization efficiency on the coke surface. The theoretical possibility of the wastewater utilization efficiency increasing using wet quenching, reducing water consumption, improving the coke quality as an important blast furnace process component, and reducing the toxic gas contamination area near the quenching tower is shown. It was established that this issues set can be solved by the water supply phasing selecting for quenching in a pulsed mode, which can ensure the coke lump cooling process uniformity. The water cooling capacity theoretical value of the under conditions of the coke standard single-stage wet quenching and under this ability full use conditions was calculated. It was shown that the using water efficiency as a cooling agent increases if it is completely evaporated and the steam is heated to the coke temperature. According to the assessment, the supply time and water consumption are reduced by 7.5 times when its cooling ability is fully utilized. It is proposed to carry out wet quenching in 3 stages: for 1 min – with concentrated wastewater, for 2 min – with diluted wastewater, for 3 min. – with technical water. The intervals system of water supply pulse mode for the coke cooling with a “supply-pause” scheme with a total quenching time of 219 s was developed, of which the total water supply time is 19 s.

Keywords: metallurgical coke, heterogeneous combustion, wet quenching, wastewater, pulse spraying, disposal

References

1. Myroshnychenko, I. V., Fatenko, S. V., Miroshnychenko, D. V., Shul'ha, I. V. (2022). Rozshyrennya syrovynnoyi bazy koksuвання та polipshennya vlastyvostey koksu yak domennoho palyva: monohrafiya. Kharkiv–Ternopil': Krok, 254. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/6b3cab3a-0be1-4c1e-81f3-6024265bf54e>
2. Trehubov, D., Dadashov, I., Mins'ka, N., Hapon, Yu. Chyrkina-Kharlamova, M. (2024). Fizyko-khimichni osnovy rozvytku ta hasinnya pozhezh horyuchykh ridyn. Kh.: NUTSZ Ukrayiny, 216. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19111>
3. Shulga, I. V., Miroshnichenko, I. V., Ryshchenko, I. M., Miroshnichenko, D. V. (2019). Moisture content of wet-quenched coke, Coke and Chemistry, 62(9), 402–407. doi: 10.3103/S1068364X19090084
4. Tregubov, D., Tarakhno, O., Sharshanov, A. (2015). Forecast efficiency phlegmatizing combustible systems by oxygen-containing mixes, Problems of Fire Safety, 37, 228–234. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3196>
5. Fidchunov, A. L., Vasil'ev, Yu. S., Fidchunov, L. N., Shulga, I. V. (2016). On

coke burnout and productivity of the USTK, *Coal Chemical Journal*, 2, 8–12. Available at: https://www.ukhin.org.ua/images/magazine/2016/2_2016/Journal1-2_2016-2.pdf

6. Kwiecińska, A., Figa, J., Stelmach, S. (2016). The Use of Phenolic Wastewater in Coke Production. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(2), 465–470. doi: 10.15244/pjoes/60725

7. Kolomiichenko, A. I., Zolotarev, I. V., Mostovoi, O. N., Kasyun, S. I., Toryanik, E. I. (2017). Producing Coke of Improved Quality, *Coke and Chemistry*, 60, 424–428. doi: 10.3103/S1068364X17110035

8. Karpenko, O., Lazarenko, O., Lazarenko, T., Nikolaychuk, Ju. (2012). Conception of improvement of resource-saving technologies and technological equipment is for production of coke with the set properties, *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 7(101), 71–76. Available at: <http://eee.khpi.edu.ua/article/view/20409>

9. Strakhov, V., Kaliakparov, A., Panfilov, V., Imanbaev, S., Aubakirov, A. (2022). Coke Quality in Medium-Temperature Coking of Fractionated Long-Flame Coal, *Coke and Chemistry*, 65, 316–334. doi: 10.3103/S1068364X22080051

10. Sklyar, I., Pyrohov, O. (2021). Deyaki osoblyvosti vyznachennya pobichnykh zbytkiv vid pozhezh. *Mizhnarodna NPK molodykh vchenykh, kursantiv ta studentiv «Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttyediyal'nosti»*. L.: LDU BZHD, 108–109. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14924>

11. Trehubov, D. H., Ponomarenko, R. V., Slepuzhnikov, Ye. D., Chyrkina, M. A. (2022). Rezhymy zneshkodzhennya stichnykh vod mikroduhovym rozryadom u systemi z ob'yemnym elektrodom. *Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dlya dovkillia v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy: monohrafiya*. Poltava–L'viv–Dnipro: Serednyak T. K., 509–519. doi: 10.23939/monograph2022

12. Delort, N., Meziane, I., Herbinet, O., Carstensen, H.-H., Battin-Leclerc, F. (2024). Experimental and modelling study of phenol combustion and oxidation, *Proceedings of the Combustion Institute*, 40, 105247. doi: 10.1016/j.proci.2024.105247

13. Maffei, L., Pelucchi, M., Faravellia, T., Cavallotti, C. (2020). Theoretical study of sensitive reactions in phenol decomposition, *Reaction Chemistry & Engineering*, 3, 452–472. doi: 10.1039/C9RE00418A

14. Trehubov, D. H., Mins'ka, N. V., Hapon, Yu. K., Tarakhno, O. V. (2024). *Teoriya protsesiv horinnya, vybukhu ta pozhezhohasinnya*. Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20224>

15. Zhun, L., Rongwei, B., Jiaming, Z., Yang, Zh. (2019). Numerical investigation on fire-extinguishing performance using pulsed water mist in open and confined spaces, *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100402. doi: 10.1016/j.csite.2019.100402

16. PubChem. Compound summary. Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

17. Glassman, I., Yetter, R., Glumac, N. (2014). *Combustion*. London: Elsevier. doi:10.1016/C2011-0-05402-9

18. Khrystych, V. V., Malyarov, M. V., Bondarenko, S. M. (2016). Modern how to improve firefighting mist water. *Problems of Fire Safety*, 40, 201–205. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198>

Надійшла до редколегії: 20.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025

N. Lysak, Postgraduate (ORCID 0000-0001-5338-4704)

O. Skorodumova, DSc, Professor, Professor of the Department (ORCID 0000-0002-8962-0155)

*A. Chernukha, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
(ORCID 0000-0002-0365-3205)*

Y. Goncharenko, PhD, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-1766-3244)

*R. Melezhyk, Researcher of the Department (ORCID 0000-0001-6425-4147)
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

STUDY OF THE INFLUENCE OF SODIUM HEXAMETAPHOSPHATE ON THE PROPERTIES OF SILICA-CONTAINING FIREPROOFING COATING FOR BUILDING MATERIALS

The composition of a silicophosphate composition intended for fire protection of building materials was developed. Solutions of liquid glass, acetic acid and sodium hexametaphosphate were used as starting components. The influence of the content of the phosphorus-containing additive on the rheological properties of silicic acid sols was studied. By spectrophotometry, it was established that the latent coagulation time in the entire range of the studied content of sodium hexametaphosphate is ~20 minutes. The highest values of optical density were recorded for a sol with an additive content of 0.3 %. The probability of the influence of electrostatic and steric effects, which depend on the concentration of the phosphorus-containing additive, on the stability of the sol was considered. It is assumed that the minimum value of sol survivability at 0.3 % of the additive is associated with a decrease in the ζ -potential and compression of the double electric layer. The results of infrared spectroscopy confirmed the hypothesis of two different mechanisms of polycondensation in different intervals of hexametaphosphate content. At a content below 0.3 %, a linear mechanism of polycondensation was noted, above 0.3 % – a reticular one. Fire tests were carried out on samples of wood and extruded polystyrene foam coated with compositions of the studied composition. The best fire-retardant properties were recorded for systems with a sodium hexametaphosphate content of 0.1–0.3 %. Processing of wood samples allowed transferring the material to the “hard-to-flame” group, the mass losses of the samples were less than 10 %. Samples of extruded polystyrene foam did not support combustion at an additive content of 0.1 % or did not burn at all at a content of 0.3%, mass losses were less than 3 %. The effect of the number of coating layers on the effectiveness of its fire-retardant action was assessed: for wood in the range of hexametaphosphate concentrations of 0.1–0.3 %, three-layer coatings were the most heat-resistant, for extruded polystyrene foam at a content of 0.3 % – one- and two-layer.

Keywords: fire-retardant silica-containing coatings, sodium hexametaphosphate, building materials, heat resistance, fire resistance, wood, polystyrene foam

1. Introduction

Today, the issue of energy efficiency is becoming one of the most global challenges for society in the context of reducing energy consumption, the rational use of which is also relevant and necessary given the depletion of traditional energy sources – oil, gas and coal.

According to the Law of Ukraine "On Energy Efficiency of Buildings", one of the main principles of state policy in this area is to ensure thermal modernization of buildings. It is also known that one of the mandatory documents in the technical passport of a residential building is an energy certificate, which reflects the energy efficiency class with the corresponding indicators (order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated July 11, 2018 № 172).

In the private sector, wood is quite often used as the main building material, which has natural thermal insulation properties. However, to achieve the required level of energy efficiency, external insulation of buildings is necessary, which is one of the simplest and most effective ways of thermal modernization. According to the requirements

of DBN V.2.6-33:2018 “External wall structures with facade thermal insulation. Design requirements”, only non-combustible materials or materials with low (group G1) or moderate (group G2) flammability can be used. However, building owners quite often neglect the requirements of safety standards, choosing more affordable alternatives to insulation materials. This, in particular, is extruded polystyrene foam, which, despite its numerous advantages, is flammable (group G3–G4).

The risk of fire due to the ignition of the above-mentioned materials can be reduced by using fire protection systems, among which silica coatings attract special attention, which form a reliable thermal insulation barrier under the influence of high temperatures. It is known that to increase the effectiveness of fire protection, it is advisable to use multicomponent systems. The most popular and widely used flame retardants are phosphorus-containing compounds. Such substances are able to inhibit combustion reactions, both in the solid phase, due to the activation of the polymer carbonization process, and in the gas phase – by deactivating radicals in the flame. Phosphorus compounds, integrated into siloxane chains, contribute to the formation of silicophosphate systems, which are characterized by thermal stability and low chemical activity. The starting components for the formation of such compositions can be synergists and will have a total effect of improving fire resistance. However, cases of antagonism may be quite possible, when the compounds reduce or even completely eliminate the positive effect of each other.

Therefore, the issue of finding components of the silicophosphate composition that would harmoniously complement each other’s advantages is key to creating a reliable and effective fire-retardant coating for building materials.

2. Analysis of literary data and problem statement

It is well known that inorganic phosphorus-based compounds have better properties than organic ones, in particular, due to higher thermal stability, lower toxicity, lower smoke generation and volatility. Therefore, most scientific works are devoted to the study of the flame-retardant properties of phosphorus-containing substances on an inorganic basis.

The authors of the work [1] investigated the inhibitory effect of three P-flame retardants on coal self-ignition. The properties of sodium orthophosphate, sodium hexametaphosphate and ammonium polyphosphate were studied by mixing raw coal and an inhibitor solution (10 wt.%) in a significant ratio of 4:1. It was found that the best suppressive effect of low-temperature oxidation of coal is provided by the addition of ammonium polyphosphate, which was confirmed in particular by the data of infrared spectrograms of the evolved gases: the maximum temperatures of gaseous products (CO_2 , CH_4 , CO and H_2O) were significantly reduced due to the deactivation of free radicals. The results of the work [1] have significant practical value, but it is worth noting that the inhibitor content was fixed, the effect of other concentrations was not investigated, which, perhaps, would have allowed optimizing the use of these flame retardants in terms of efficiency and cost-effectiveness.

The flame-retardant content is of great importance for achieving a balance between ensuring effective fire protection of the material and preserving its operational characteristics. The problem of overloading polymers with such compounds was considered in [2]. Styrene composites containing 15 wt.% aluminum hypophosphite or 15 wt.% expandable graphite did not withstand the UL-94 vertical burning test, while polymers with 10 wt.% phosphorus-containing flame retardant and 5 wt.% graphite passed this test. With the

synergistic action of flame retardants, a more significant degree of carbonization was also observed. The results of the study are certainly valuable for the theoretical understanding of the above-mentioned issues, but a disadvantage of the proposed method for increasing the fire resistance of polystyrene may be the high cost of expandable graphite, which limits the use of the above composition in mass production conditions.

When choosing a phosphorus-containing compound, it is important to ensure a high mass fraction of phosphorus. Given this requirement for a component of a fire-retardant composition, it is advisable to use pure phosphorus to maximize the amount of the active element. For example, in work [3], red phosphorus and expandable graphite were used as flame retardants. This combination allowed to reduce the peak heat release rate during the combustion of polystyrene to 180.67 kW/m^2 , which was 72.9 % lower than that of the pure sample. The authors of work [4] proposed a fire-retardant composition for impact-resistant polystyrene based on microencapsulated red phosphorus and magnesium hydroxide. The synergistic effect of the two components contributed to a significant reduction in the limiting oxygen index during the combustion of the polymer. The introduction of phosphorus accelerated the endothermic degradation of the hydroxide and contributed to the intensification of the charring process. Despite the importance of the theoretical results of the works [3, 4], a significant limitation when using the proposed compositions may be the low solubility of phosphorus in aqueous media, which accordingly complicates the uniform distribution of the flame retardant and may lead to a decrease in the effectiveness of fire protection.

Many researchers use a strategy to increase the fire resistance of polystyrene, which is based on the inhibitory effect of components in both the condensed and gas phases [5]. This effect can often be achieved due to the synergy of the following elements: P–N, P–Si or P–N–Si. For example, in the study [6], such a flame retardant was obtained by the interaction between N – β -(aminoethyl)- γ -aminopropyltrimethoxysilane and phosphoric acid. The technological feature of the process of creating a fire-retardant system, which consisted in applying the resulting composition to the surface of polystyrene, made it possible to preserve its basic physical properties (density and compressive strength). However, the results of the work [6] showed that the proposed combination of compounds did not allow to significantly reduce the load on the polymer: the lowest content of flame retardant required to achieve a V-0 rating in the UL-94 test was quite high – about 40 wt.%. In addition, the silicon-containing component was organic, which calls into question its environmental friendliness.

Fire retardant compositions based on silicic acid sols are characterized by relatively high safety and thermal stability. Taking into account the effectiveness of multicomponent systems, previously conducted studies were devoted to the complex effect of silica together with orthophosphoric acid [7] and phosphate buffer solutions [8] on the effectiveness of fire-retardant coatings. Based on the considered compositions [7, 8], fire-retardant coatings were created that significantly reduced the combustibility and flammability of wood and extruded polystyrene foam. However, taking into account modern trends in the improvement and rationalization of multicomponent systems, there is a need to find an alternative that could provide additional advantages. In this aspect, the use of sodium hexametaphosphate may be promising, one of the features of which is the high phosphorus content (in terms of P_2O_5 over 63 %) among phosphates produced industrially. This unique characteristic of it can provide significant savings in large-scale production of fire-retardant compositions, reducing material costs. The compound is non-toxic and biodegradable.

In addition, there are works in which this component was used as a dispersant,

which contributed to the stabilization of colloidal systems and prevented premature aggregation of particles [9–11]. Therefore, it can be assumed that the use of hexametaphosphate in silica-containing compositions will provide the opportunity to create coatings with high fire-retardant efficiency and appropriate mechanical and physico-chemical properties.

3. Purpose and objectives of the study

The purpose of the work is to study the influence of sodium hexametaphosphate on the formation of the structure and fire-retardant properties of silica-based coatings.

To achieve the set goal, it was necessary to perform the following tasks:

- to study the rheological properties of silicic acid sols modified with sodium hexametaphosphate and the gelation processes in them;
- to perform fire tests of wood and extruded polystyrene foam samples to assess the effectiveness of the fire-retardant silicophosphate coating.

4. Materials and research methods

The object of research is the technology of increasing the fire resistance of finishing building materials made of wood and extruded polystyrene foam.

The subject of research is the physicochemical behavior of fire-retardant coatings during fire exposure.

The main hypothesis of the research is the synergistic effect of silicon and phosphorus compounds, which ensures an increase in the efficiency of the fire-retardant coating.

The solutions of liquid glass and acetic acid were mixed using a magnetic stirrer. A solution of sodium hexametaphosphate (SHMP) was added to the obtained silicic acid sols, the content of which was varied within the range of 0.01–1 wt. %.

The rheological properties of the sols were investigated by determining the change in optical density over time using a KFK-2 photo colorimeter using a cuvette with $l=5$ cm at a wavelength of 490 nm. Distilled water was taken as a reference solution.

Heat treatment of silica gels was carried out at 800 °C in an oxidizing environment (air), maintaining at a maximum temperature for 2 h (temperature rise rate 4–5 °C/min).

For raw and heat-treated gels, infrared absorption spectra were recorded on an FTIR-8400S spectrometer equipped with a QATR 10 (Shimadzu) attachment in the range of 400–4000 cm^{-1} . IRsolution and ACD/Lab's software were used to analyze the spectra.

The resulting compositions were applied to the surface of experimental samples by the bath method. Wood samples measuring 9x6x3 cm were used, previously dried to constant mass in a drying oven at 100 °C, as well as samples of extruded polystyrene foam of the XPS brand measuring 5x5x3 cm. 2–3 layers of coating were applied after drying the previous layer at 80°C in a drying oven. Additionally, a 20 % aqueous solution of ammonium dihydrogen phosphate was sprayed onto the surface of the dried samples, after which they were dried.

The fire protection efficiency group of coatings on the surface of wood was determined according to DSTU 4479:2005 [12], the flammability group according to DSTU 8829:2019 [13].

Samples of extruded polystyrene foam were weighed before and after exposure to fire for 10 s, and the mass loss was expressed in percent.

5. Study of the influence of sodium hexametaphosphate on the rheological properties of experimental sols and gelation processes

The curves of changes in the optical density of sols over time depending on the HMP content are presented in Fig. 1.

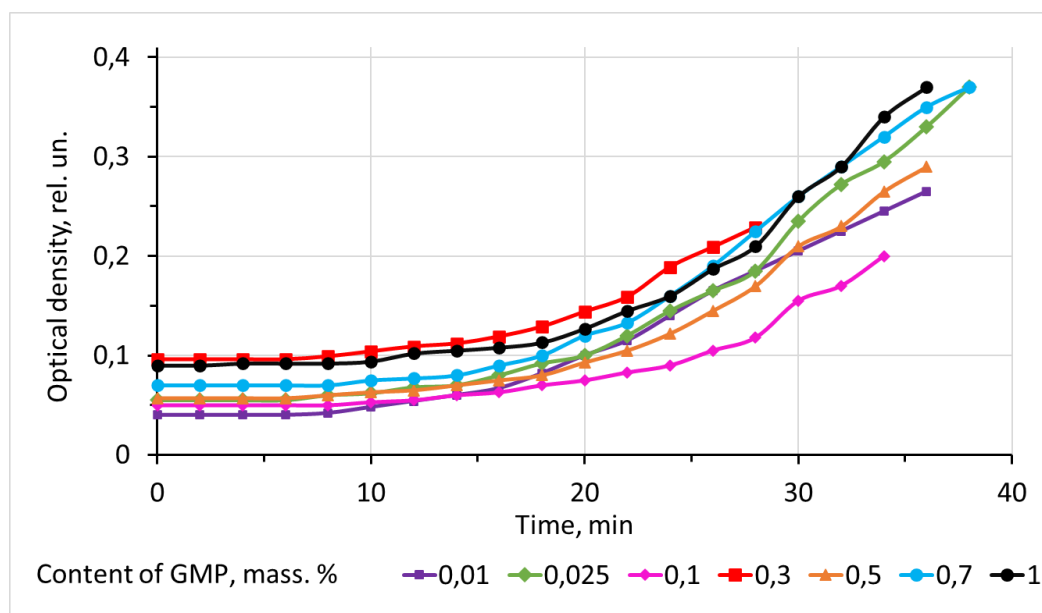


Fig. 1. Dependence of the change in optical density of experimental silicic acid sols with SHMP additives over time

On the graph, the dependences are identical in nature. Almost the same increase in the angle of inclination of the tangents to the curves shows that the process of growth of colloidal particles and their aggregation into associates begins for all compositions, regardless of the additive content, after approximately 20 min.

The dependence for the SHMP concentration of 0.3 % demonstrates noticeably higher values of optical density compared to other concentrations at all stages of measurement. Probably, under the conditions of such an additive content, particle aggregation occurs most intensively. It is also worth noting that the initial values of optical density are directly proportional to the SHMP content in the compositions.

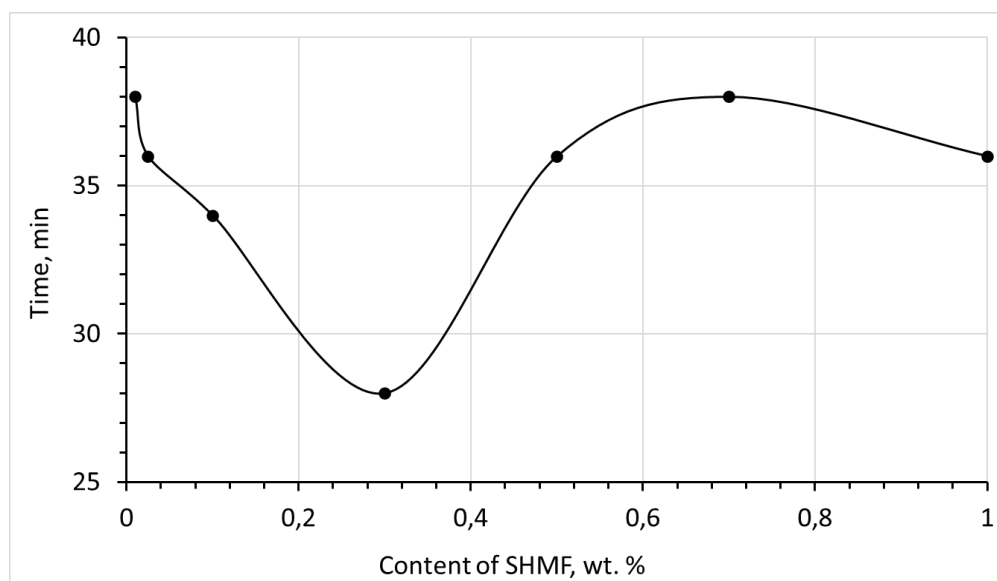


Fig. 2 Shows the dependence of the survival time of sols on the SHMP content

For a concentration of 0.3 %, a minimum is observed on the graph. This dependence, apparently, correlates well with the maximum values of optical density at this SHMP content, compared to compositions with a different quantitative composition.

It can be assumed that the presence of a minimum on the graph is associated with a change in the electrokinetic potential when a non-indifferent electrolyte is introduced into the system.

For dispersed systems, an important role is played by an electric double layer (EDL), which, as a rule, is formed at the interface of two phases from spatially separated electric charges of opposite sign. The potential jump that occurs at the interface of the adsorption (Stern layer) and diffusion parts of the EDL during electrokinetic phenomena is the ζ -potential.

Silicic acid sol is capable of forming a significant amount of OH^- , HSiO_3^- and SiO_3^{2-} ions as a result of hydrolysis and ionization processes. These anions are quite densely adsorbed in the Stern layer on the surface of silica particles (Fig. 3, a).

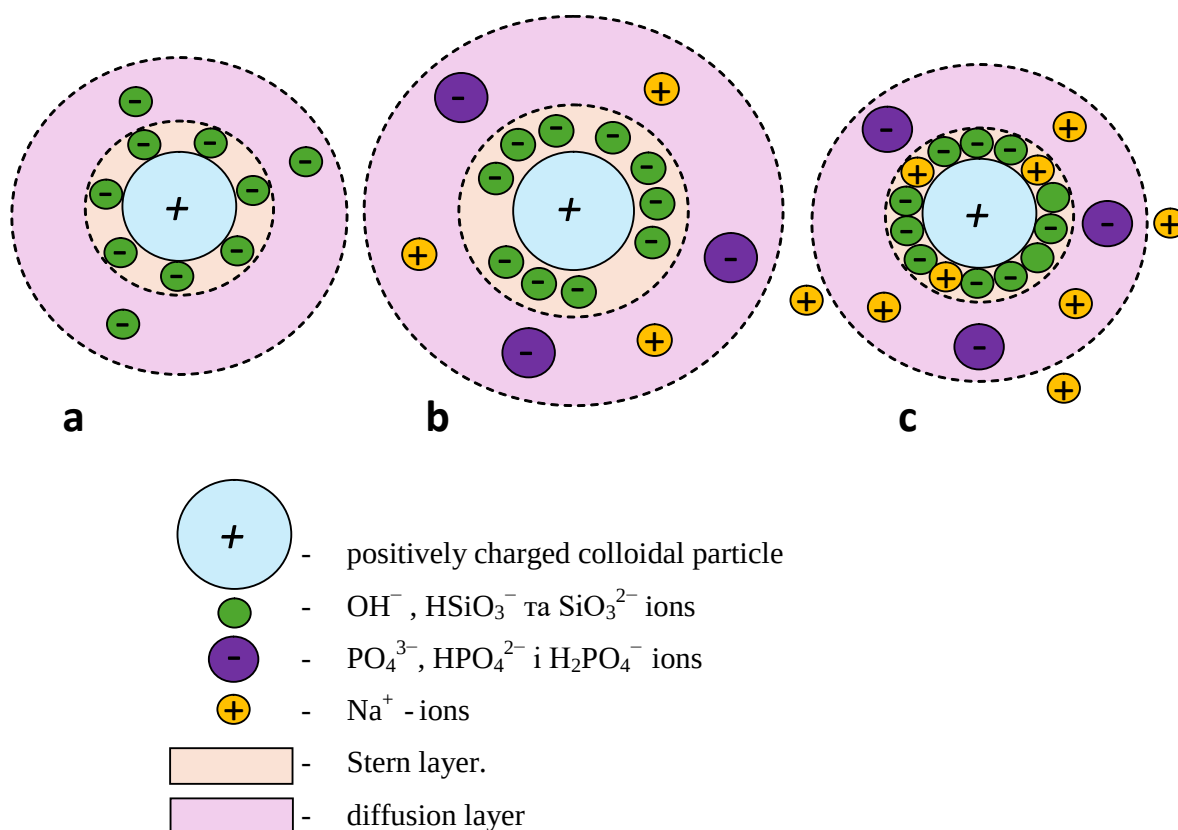


Fig. 3. Scheme of the dependence of the electric double layer and electrokinetic potential for silicic acid sols: a – without SHMP, b – with a low SHMP content; c – with a high SHMP content

Sodium hexametaphosphate in solution can also hydrolyze to form PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} and H_2PO_4^- anions. Accordingly, a larger number of anions is adsorbed in the Stern layer, which leads to the expansion of the EDL between neighboring SiO_2 particles. The absolute value of the electrokinetic potential increases (Fig. 3, b).

With a further increase in the concentration of SHMP, the number of anions increases, but the number of ions of the opposite charge (counterions) Na^+ also increases, so they diffuse from the diffusion layer into the adsorption layer under the action of electrostatic repulsion forces. In this case, the EDL is compressed and the absolute value of the ζ -potential decreases (Fig. 3, c).

All IR absorption spectra of raw SiO_2 gels modified with sodium hexametaphosphate had the same set of characteristic bands. Fig. 4 shows the IR absorption spectrum for silica gel with a SHMP content of 0.7 %.

In all IR spectra of silica gels with different SHMP contents, a broad band is visible in the range of $2800\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$, which characterizes the stretching vibrations of O–H bonds. This may indicate the presence of silanol groups or adsorbed water. It is worth noting that with a GMP content of 0.025 to 0.5 %, separate peaks at 3160 , 3270 and 3400 cm^{-1} are observed in such a broad band.

For gels with an additive concentration of 0.7 and 1 %, the band in the range of $2800\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ is more intense and smoothed.

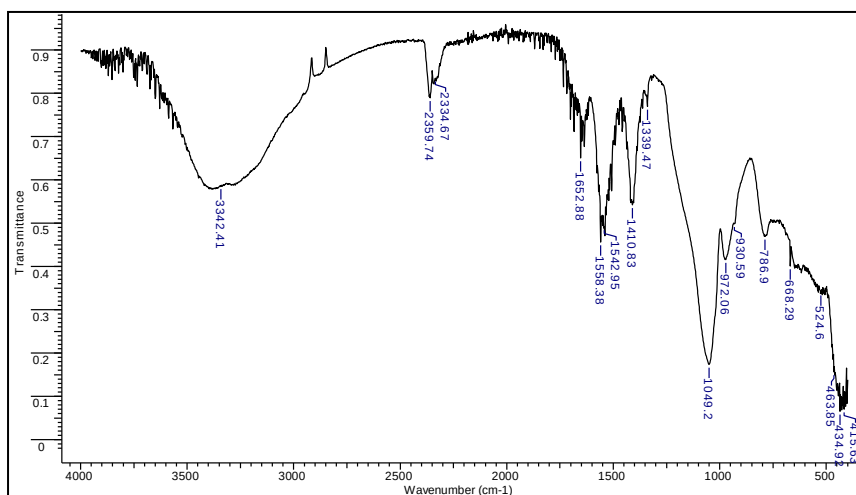


Fig. 4. IR spectra of raw SiO_2 gels with a SHMP content of 0.7 wt. %

As for other studied silica systems described earlier [14], the IR spectra of SiO_2 gels modified with SHMP show rather intense absorption bands at 1410 , 1540 and 1635 cm^{-1} , which characterize the deformation vibrations of hydroxyl groups [15].

The spectra of gels with a SHMP content of 0.025–0.5 % are characterized by the presence of a small peak at 1020 cm^{-1} , which also characterizes the valence asymmetric vibrations of siloxane bonds, as well as the band at 1050 cm^{-1} [16].

In the range of $400\text{--}470\text{ cm}^{-1}$, deformation vibrations of Si–O–Si bonds are usually recorded. For gels with a 0.7–1% SHMP content, the intensity of the bands in this range is relatively higher.

The vibrations of the P–O bonds are recorded in the range of $650\text{--}800\text{ cm}^{-1}$. In the range of $500\text{--}530\text{ cm}^{-1}$, vibrations of the bonds in the PO_4^{3-} groups appear. In the spectra of all compositions, the most pronounced bands are at 517 cm^{-1} and 670 cm^{-1} .

To analyze the characteristic absorption bands corresponding to the vibrations of silanol (970 cm^{-1}) and siloxane bonds (790 and 1050 cm^{-1}), their relative intensity was estimated (Fig. 5).

It is not difficult to notice that at a SHMF content of 0.3 % in the composition all bands have the lowest intensity. At additive concentrations of 0.7 and 1 %, the intensity of the absorption bands at 1050 cm^{-1} , which characterizes the vibrations of Si–O–Si bonds, is significantly higher compared to compositions with other quantitative contents. To establish the nature of polycondensation in silicic acid sols, the ratio of the intensity of the band at 1050 cm^{-1} to its half-width – the I/d index (Fig. 6) was estimated.

It is known that the ratio of the intensity to the half-width of the characteristic band of the Si–O bond vibrations at 1050 cm^{-1} indirectly indicates the nature of the

polycondensation of polysilicic acid: the smaller this value, the more likely linear polycondensation, however, an increase in C/d indicates the appearance of network blocks in the siloxane chain [14]. In the range of SHMP concentrations of 0.025–0.3 %, the I/d ratio decreases, reaching a minimum at 0.3 %. It was at this additive content that the maximum values of optical density and the minimum survivability of the sol were observed. At high SHMP concentrations (more than 0.3 %), the I/d index increases, therefore, conditions are created for the course of network polycondensation, which contributes to the formation of rigid structures.

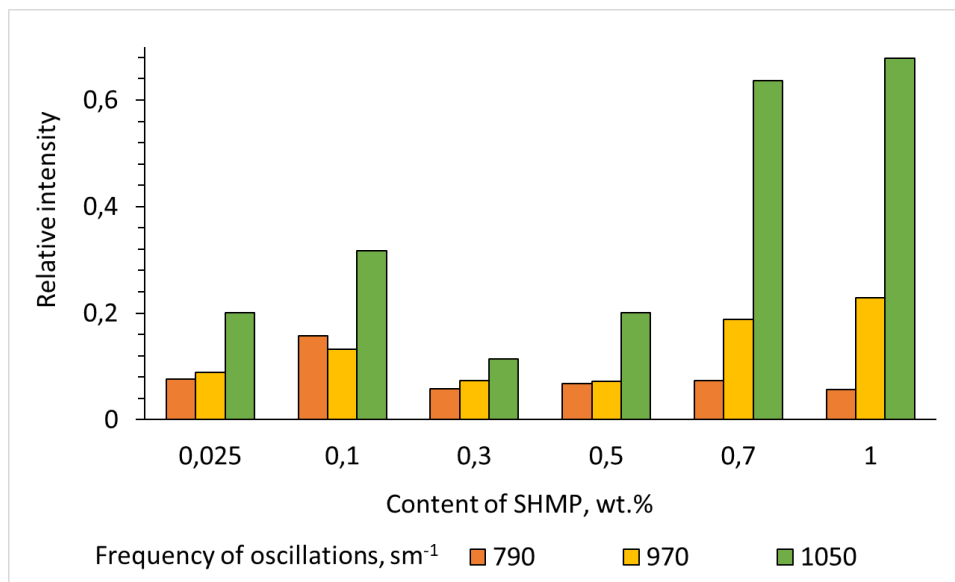


Fig. 5. Change in relative intensity of characteristic bands of raw SiO_2 gels with sodium hexametaphosphate additives

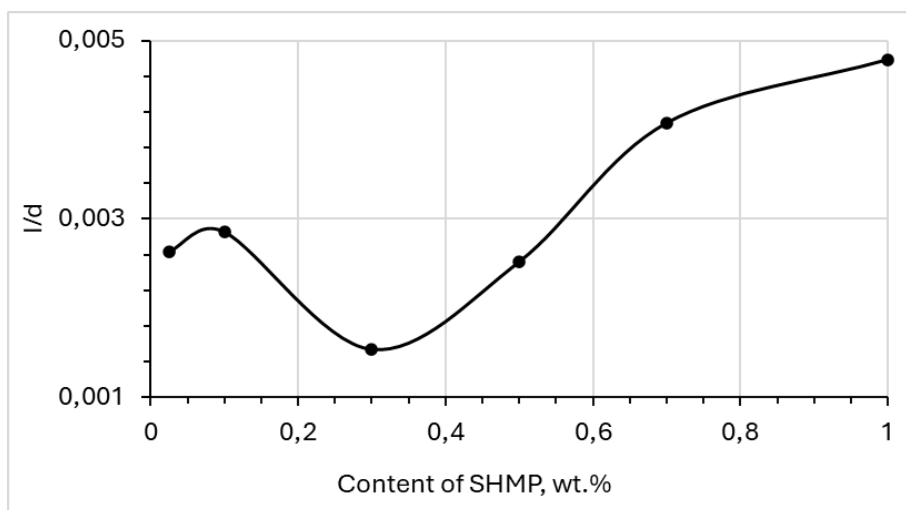


Fig. 6. Influence of sodium hexametaphosphate content on the nature of polycondensation in SiO_2 gels

For the absorption spectra of heat-treated SiO_2 gels modified with sodium hexametaphosphate, the disappearance of the absorption band in the range of $2800\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ is observed in the entire range of SHMP concentrations as a result of water removal. The formation of a broad band in the range of $800\text{--}1200\text{ cm}^{-1}$ is noted, but for gels with a SHMP addition of 0.025–0.3 %, this band shows a noticeable separation of individual peaks at 920 and 1030 cm^{-1} , while for samples with an additive concentration of 0.5–1 %, the band is more smoothed and uniform.

6. Results of determining the fire-retardant efficiency of silicophosphate coating on wooden samples

Tabl. 1 shows the results of establishing the fire protection efficiency group of the coating and the flammability class for wood samples.

Tabl. 1. Results of studies on determining the fire protection efficiency group and flammability class for wood samples

№	SHMP content, %	Number of coating layers	Sample mass loss (120 s), %	Coating fire protection efficiency group	$\Delta T_{\max}$, °C	Time to reach maximum temperature, c	Sample mass loss, %	Combustibility
1	0.1	1	7.51	I	90	390	34.13	flammable, highly flammable
2		2	9.2	II	84	500	41.39	
3		3	8.95	I	91	400	33.72	
4	0.3	1	7.9	I	104	590	57.43	
5		2	9.73	II	75	550	40.63	
6		3	9.89	II	80	560	39.34	
7	0.5	1	11.97	II	120	170	20.84	flammable, medium flammability
8		2	10.42	II	110	200	34.41	
9		3	8.46	I	115	200	29.82	

Thanks to coatings with a SHMP content of 0.1–0.3 %, wood samples were transferred from the group of highly flammable to the group of low-flammability. The mass losses of the samples during 2 min of fire tests ranged from 7.5 to 9.9 %, which corresponds to groups I–II of the fire-protective efficiency of the coatings. It should be noted that the time to reach the maximum temperature for samples coated with compositions with a SHMP content of 0.3 % was higher (550–590 s) than for similar ones with 0.1 % SHMP (390–500 s). Samples with coatings based on compositions with 0.5 % SHMP had average flammability and had a relatively shortest time to reach the maximum temperature (170–200 s).

For experimental samples coated with compositions with a sodium hexametaphosphate content of 0.1–0.3 %, lower mass losses of the samples were observed. In this interval, single- and double-layer coatings gave almost the same fire-retardant efficiency indicators. At a content of 0.5 %, the mass losses of the samples were inversely proportional to the number of coating layers.

Fig. 7 shows the dependence of the mass loss of the samples during 2 min of fire tests on the number of coating layers. The lowest mass losses are provided by a single-layer coating in the range of SHMP content of 0.1–0.3 %. Relatively low mass loss indicators are also characteristic of a three-layer coating obtained on the basis of a sol with an additive content of 0.5 %.

The influence of the fire test time on the mass loss of samples was studied. With increasing fire exposure time, the mass loss of samples increased. Given the general trend, the best fire protection was provided by a three-layer coating, because even after 10 minutes of fire exposure, the samples retained more than half of their initial mass.

In the range of SHMP concentrations of 0.1–0.3 % for a single-layer coating, a slight increase in mass loss was observed, which can be explained by the insufficient fire-retardant properties of the coating with such a thickness.

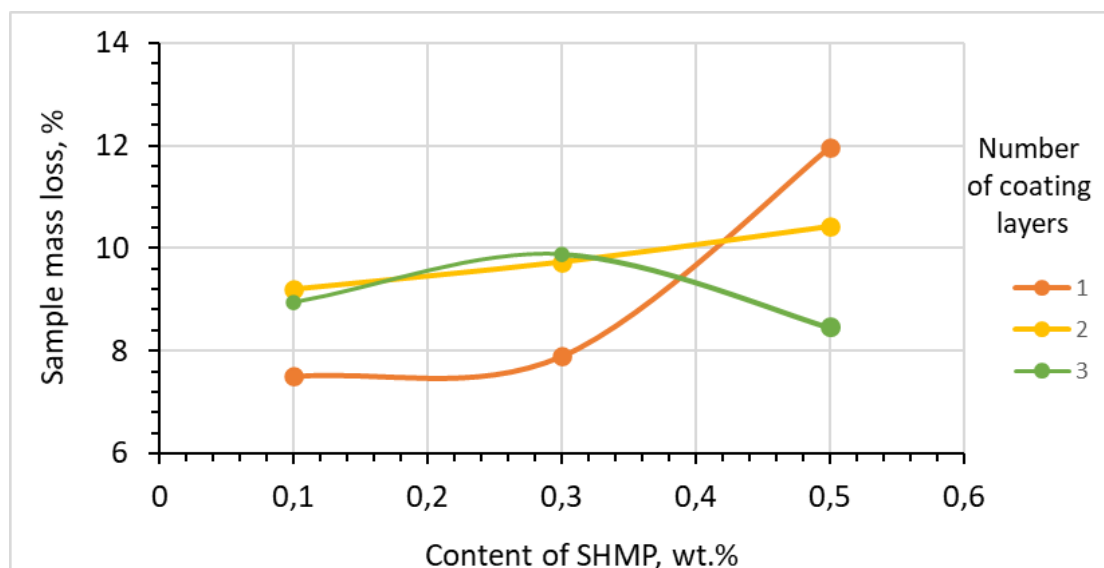


Fig. 7. The effect of sodium hexametaphosphate content on the change in mass loss of samples during fire tests for 2 min

For coatings applied in two and three layers, the trend described above was maintained throughout the fire test time. At a SHMP content of 0.3 %, the mass loss of samples was minimal. At 0.5 % of the additive, the mass loss became greater.

7. Study of the effect of sodium hexametaphosphate on the fire resistance of extruded polystyrene foam

Tabl. 2 shows the results of fire tests for extruded polystyrene foam samples.

Tabl. 2. Fire test results for extruded polystyrene foam samples

№	SHMP content, %	Number of coating layers	Sample mass loss, %	Ignition time, s	Note
1	Untreated sample		-	3	actively burned with the formation of burning drops
2	0.1	1	-	4	burned without the formation of burning droplets
3		2	-	8	
4		3	2.5	5	did not support combustion
5	0.3	1	1.57	-	did not burn
6		2	2.97	-	
7		3	-	7	
8	0.5	1	-	6	burned without the formation of burning droplets
9		2	-	5	
10		3	-	4	

As in the case of the study of the fire-retardant properties of a coating of a similar composition on a wood surface, the data in Tabl. 2 indicate the best fire-retardant performance of extruded polystyrene foam for compositions with a SHMP content of 0.1–0.3 %. Samples coated with compositions with a higher concentration of the component supported combustion, but a significant problem accompanying the combustion of polystyrene foam was eliminated – the formation of burning drops.

8. Discussion of the results of the study of the influence of sodium hexametaphosphate on the fire-retardant efficiency of coatings based on it

The dependence of the survival time of silicic acid sols on the content of sodium hexametaphosphate used as a modifier had a nonlinear U-shaped character with a clearly pronounced minimum at 0.3 % SHMP (Fig. 2).

This trend may be associated with electrical interactions that affect the stability of the sol and determine the degree of electrostatic repulsion between particles. The value of the ζ -potential, which reflects the difference in electric potentials between solid particles and the solution, serves as the main indicator of this repulsion. At high values of the ζ -potential, the colloidal system remains stably dispersed, preventing particle aggregation.

The decrease in the survival time of the sol in the range of 0.01–0.3 % with increasing additive content can probably be interpreted as an insufficient amount of hexametaphosphate to create an effective and uniform coating on the surface of colloidal particles. That is, some areas remain uncharged or insufficiently charged and are the cause of easy adhesion of particles, since the repulsive forces between them are insufficient to prevent them from coming closer together.

At the point of 0.3 %, a decrease in the ζ -potential can be observed due to the compression of the double electric layer, which leads to a decrease in electrostatic stabilization and an increase in the tendency to aggregation, respectively, a minimum survival time is observed.

In the concentration range of 0.3–1 %, it is likely that a more complete overlap of the particle surface with anions occurs, which contributes to the formation of a more stable Stern layer. But to a greater extent, an additional stabilization mechanism begins to manifest itself – the steric effect, i.e., HMF ions create a kind of physical barrier on the surface of the particles, which prevents their coagulation.

Such assumptions about the presence of two different mechanisms of formation of fire-retardant coatings in two different ranges of GMF content are confirmed by the results of infrared spectroscopy of raw silica gels. The smallest value of the ratio of the intensity of the absorption band at 1050 cm^{-1} , which corresponds to the vibrations of siloxane bonds, to its half-width, was observed at a SHMP content of 0.3 % (Fig. 6), which correlates well with the results of the study of rheological properties (Fig. 1–2). The linear mechanism of polycondensation is realized at an additive content of less than 0.3 %, which contributes to the formation of elastic coatings that are well held on the surface of the material. At values exceeding this indicator, network polycondensation probably occurs, which is characterized by the presence of clathrates – closed or semi-closed cavities formed by the spatial structure of silica, where water and other polycondensation products can be retained. A probable confirmation of this fact can also be an increase in the intensity of absorption bands in the IR spectra corresponding to hydroxyl groups, which may belong to adsorbed water molecules. The shape of the infrared spectra for heat-treated silica gels also confirms the fact of the presence of a linear polycondensation process at a GMP content of less than 0.3% and a reticular one above this value.

The hypothesis put forward is also confirmed by the results of fire tests. The smallest mass losses of wood samples were observed in the range of phosphorus-containing component content of 0.1–0.3 % (Tabl. 1), which indicates a linear mechanism of polycondensation. The results of studies of the influence of fire exposure time on mass losses of samples showed that the best fire-protective properties are provided

by a three-layer coating (Fig. 8). The relatively short time intervals for reaching the maximum temperature at a content of 0.5 % may indicate the heterogeneity of the coating structure, i.e. a network mechanism of polycondensation.

If we assume that in the concentration range >0.3 %, there is already a network polycondensation, which contributes to the formation of less homogeneous coatings, then it is multilayering that can compensate for this disadvantage. Increasing the number of coating layers allows you to cover areas of the material where the coating has a loose structure, or is absent altogether (Fig. 7).

For extruded polystyrene foam, the best fire-retardant properties were shown by coatings obtained on the basis of compositions with the same SHMP content as in the case of wood (Tabl. 2). The reason that the samples did not burn (0.3 %) or did not support combustion (0.1 %) is the homogeneous structure of the coating, which does not crack when exposed to fire, and accordingly prevents the formation of point ignition of the foam.

Therefore, the silica-containing composition modified with 0.3% sodium hexametaphosphate can potentially be considered as a flame retardant for both natural (wood) and synthetic (expanded polystyrene) polymers.

Further research will be aimed at optimizing the composition by investigating and comparing the effects of other phosphorus-containing components on the flame-retardant properties of coatings on the surface of finishing building materials.

9. Conclusions

1. The effect of sodium hexametaphosphate on the gelation processes in silicic acid sols was investigated. It was found that the dependence of the survival time of the compositions on the additive content has a nonlinear U-shaped character with a minimum at a content of 0.3 %, which may be a transition point between two processes that are different in nature. According to infrared spectra, a linear mechanism of polycondensation was confirmed at a content of less than 0.3 % and a network mechanism at a content of more than 0.3 %.

2. It was found that a coating based on silicic acid sol modified with a sodium hexametaphosphate solution (at a 0.1–0.3 % additive content) provides optimal fire-retardant characteristics for wood, transferring the material to the “flammable” group.

The use of the developed coatings with GMF additives allows preventing the formation of burning drops (at a 0.1 % additive content) and even preventing the ignition of extruded polystyrene foam under conditions of optimal additive content (0.3 %).

References

1. Hou, X., Guo, L., Wang, F. (2021). Inhibiting effects of three phosphates on coal spontaneous combustion. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42(10), 3054–3069. doi: 10.1080/19392699.2021.1932844
2. Zhu, Z., Rao, W., Kang, A., Liao, W., Wang, Y. (2018). Highly effective flame retarded polystyrene by synergistic effects between expandable graphite and aluminum hypophosphite. *Polymer Degradation and Stability*, 154, 1–9. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.015
3. Ji, W., Yao, Y., Guo, J., Fei, B., Gu, X., Li, H., Sun, J., Zhang, S. (2020). Toward an understanding of how red phosphorus and expandable graphite enhance the fire resistance of expandable polystyrene foams. *Journal of Applied Polymer Science, Chemical Technologies and Engineering*. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-9

ence, 137(35). doi: 10.1002/app.49045

4. Liu, J., Guo, Y., Chang, H., Li, H., Xu, A., Pan, B. (2018). Interaction between magnesium hydroxide and microencapsulated red phosphorus in flame-retarded high-impact polystyrene composite. *Fire and Materials*, 42(8), 958–966. doi: 10.1002/fam.2650

5. Baby, A., Tretsiakova-McNally, S., Arun, M., Joseph, P., Zhang, J. (2020). Reactive and Additive Modifications of Styrenic Polymers with Phosphorus-Containing Compounds and Their Effects on Fire Retardance. *Molecules*, 25(17), 3779. doi: 10.3390/molecules25173779

6. Zhu, Z., Xu, Y., Liao, W., Xu, S., Wang, Y. (2017). Highly Flame Retardant Expanded Polystyrene Foams from Phosphorus–Nitrogen–Silicon Synergistic Adhesives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(16), 4649–4658. doi: 10.1021/acs.iecr.6b05065

7. Lysak, N., Skorodumova, O., Chernukha, A. (2023). Development of a fireproof coating containing silica for polystyrene. *Problems of Emergency Situations*, 2(38), 192–202. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-10

8. Lysak, N., Skorodumova, O., Chernukha, A., Goncharenko, Y., Melezhyk, R. (2024). Silicophosphate fireproof coatings for building materials. *Problems of Emergency Situations*, 1(39), 262–271. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-19

9. Li, Y., Guo, A., Xu, X., Xue, Y., Yan, L., Hou, F., Liu, J. (2022). Preparation and properties of highly elastic, lightweight, and thermally insulating SiO₂ fibrous porous materials. *Materials*, 15(9), 3069. doi: 10.3390/ma15093069

10. Zhang, Y., Liu, H., Liu, J., Tong, R. (2019). Effect of sodium hexametaphosphate and trisodium phosphate on dispersion of polycarboxylate superplasticizer. *Materials*, 12(24), 4190. doi: 10.3390/ma12244190

11. Ramirez, A., Rojas, A., Gutierrez, L., Laskowski, J. S. (2018). Sodium hexametaphosphate and sodium silicate as dispersants to reduce the negative effect of kaolinite on the flotation of chalcopyrite in seawater. *Minerals Engineering*, 125, 10–14. doi: 10.1016/j.mineng.2018.05.008

12. DSTU 4479:2005. Rechovyny vohnezhakhysni vodorozchynni dlia derevyny. Zahalni tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvannia. Chynnyi z 01.10.2006. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 17.

13. DSTU 8829:2019. Pozhezhovybukhonebezpechnist rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhnoho vyznachennia. Klasyfikatsiia. Chynnyi z 01.01.2020. Vyd. ofits. Kyiv: UkrNDNTs, 75.

14. Lysak, N., Skorodumova, O., Chernukha, A., Kochubei, V., Sotiriadis, K. (2025). Study of Gelation Processes in Flame Retardant Compositions of the SiO₂ Sol System – A Phosphate-Containing Additive. *Defects and Diffusion Forum*, 438, 101–110. doi: 10.4028/p-I2sYIR

15. Zribi, M., Baklouti, S. (2021). Investigation of phosphate based geopolymers formation mechanism. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 562, 120777. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120777

16. Karan, R., Pal, P., Maiti, P., Das, K. (2021). Structure, properties and in-vitro response of SiO₂-Na₂O-CaO-P₂O₅ system, based glass-ceramics after partial replacement of Na₂O by Li₂O. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 556, 120554. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120554

Н. М. Лисак, аспірант

О. Б. Скородумова, д.т.н., професор, проф. каф.

А. А. Чернуха, к.т.н., доцент, доц. каф.

Я. М. Гончаренко, к.т.н., ст. викл. каф.

Р. С. Мележик, н.с. відділу

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАТРІЙ ГЕКСАМЕТАФОСФАТУ НА ВЛАСТИВОСТІ КРЕМНЕЗЕМВМІСНОГО ВОГНЕЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено склад силікофосфатної композиції, призначеної для вогнезахисту будівельних матеріалів. Як вихідні компоненти використовували розчини рідкого скла, оцтової кислоти та натрій гексаметафосфату. Досліджено вплив вмісту фосфоровмісної добавки на реологічні властивості золь кремнієвої кислоти. Методом спектрофотометрії встановлено, що час прихованої коагуляції в усьому діапазоні досліджуваного вмісту натрій гексаметафосфату становить ~20 хвилин. Зафіксовано найвищі значення оптичної густини для золю з умістом добавки 0,3 %. Розглянуто імовірність впливу електростатичних та стеричних ефектів, що залежать від концентрації фосфоровмісної добавки, на стійкість золю. Припущено, що мінімальне значення живучості золю при 0,3 % добавки пов'язано зі зниженням ζ -потенціалу та стисненням подвійного електричного шару. Результатами інфрачервоної спектроскопії підтверджено висунуту гіпотезу про два різні механізми поліконденсації в різних інтервалах вмісту гексаметафосфату. При вмісті нижче 0,3 % відзначено лінійний механізм поліконденсації, вище 0,3 % – сітчастий. Проведено вогневі випробування зразків деревини та екструдованого пінополістиролу, вкритих композиціями досліджуваного складу. Найкращі вогнезахисні властивості зафіксовано для систем з умістом натрій гексаметафосфату 0,1–0,3 %. Обробка зразків деревини дозволила перевести матеріал до групи «важкозаймисті», втрати маси зразків становили менше 10 %. Зразки екструдованого пінополістиролу не підтримували горіння при вмісті добавки 0,1 % або не горіли зовсім при вмісті 0,3 %, втрати маси становили менше 3 %. Було оцінено вплив кількості шарів покриття на ефективність його вогнезахисної дії: для деревини в інтервалі концентрацій гексаметафосфату 0,1–0,3 % найбільш термостійкими були тришарові покриття, для екструдованого пінополістиролу при вмісті 0,3 % – одно- та двошарові.

Ключові слова: вогнезахисні кремнеземвмісні покриття, натрій гексаметафосфат, будівельні матеріали, термостійкість, вогнестійкість, пінополістирол

Література

1. Hou X., Guo L., Wang F. Inhibiting effects of three phosphates on coal spontaneous combustion. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2021. Vol. 42. № 10. P. 3054–3069. doi: 10.1080/19392699.2021.1932844
2. Zhu Z., Rao W., Kang A., Liao W., Wang Y. Highly effective flame retarded polystyrene by synergistic effects between expandable graphite and aluminum hypophosphite. *Polymer Degradation and Stability*. 2018. № 154. P. 1–9. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.015
3. Ji W., Yao Y., Guo J., Fei B., Gu X., Li H., Sun J., Zhang S. Toward an understanding of how red phosphorus and expandable graphite enhance the fire resistance of expandable polystyrene foams. *Journal of Applied Polymer Science*. 2020. Vol. 137. № 35. doi: 10.1002/app.49045
4. Liu J., Guo Y., Chang H., Li H., Xu A., Pan B. Interaction between magnesium hydroxide and microencapsulated red phosphorus in flame-retarded high-impact polystyrene composite. *Fire and Materials*. 2018. Vol. 42. № 8. P. 958–966. doi: 10.1002/fam.2650

5. Baby A., Tretsiakova-McNally S., Arun M., Joseph P., Zhang J. Reactive and Additive Modifications of Styrenic Polymers with Phosphorus-Containing Compounds and Their Effects on Fire Retardance. *Molecules*. 2020. Vol. 25. № 17. P. 3779. doi: 10.3390/molecules25173779
6. Zhu Z., Xu Y., Liao W., Xu S., Wang Y. Highly Flame Retardant Expanded Polystyrene Foams from Phosphorus–Nitrogen–Silicon Synergistic Adhesives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. Vol. 56. № 16. P. 4649–4658. doi: 10.1021/acs.iecr.6b05065
7. Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A. Development of a fire-proof coating containing silica for polystyrene. *Problems of Emergency Situations*. 2023. Vol. 2. № 38. P. 192–202. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-10
8. Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A., Goncharenko Y., Melezhyk R. Silicophosphate fireproof coatings for building materials. *Problems of Emergency Situations*. 2024. Vol. 1. № 39. P. 262–271. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-19
9. Li Y., Guo A., Xu X., Xue Y., Yan L., Hou F., Liu J. Preparation and properties of highly elastic, lightweight, and thermally insulating SiO₂ fibrous porous materials. *Materials*. 2022. Vol. 15. № 9. P. 3069. doi: 10.3390/ma15093069
10. Zhang Y., Liu H., Liu J., Tong R. Effect of sodium hexametaphosphate and trisodium phosphate on dispersion of polycarboxylate superplasticizer. *Materials*. 2019. Vol. 12. № 24. P. 4190. doi: 10.3390/ma12244190
11. Ramirez A., Rojas A., Gutierrez L., Laskowski J.S. Sodium hexametaphosphate and sodium silicate as dispersants to reduce the negative effect of kaolinite on the flotation of chalcopyrite in seawater. *Minerals Engineering*. 2018. № 125. P. 10–14. doi: 10.1016/j.mineng.2018.05.008
12. ДСТУ 4479:2005 Речовини вогнезахисні водорозчинні для деревини. Загальні технічні вимоги та методи випробування. Чинний з 01.10.2006. Київ: Держспоживстандарт України, 2006. 17 с.
13. ДСТУ 8829:2019. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. Чинний з 01.01.2020. Вид. офіц. Київ: УкрНДНЦ, 2020. 75 с.
14. Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A., Kochubei V., Sotiriadis K. Study of Gelation Processes in Flame Retardant Compositions of the SiO₂ Sol System – A Phosphate-Containing Additive. *Defects and Diffusion Forum*. 2025. № 438. P. 101–110. doi.org/10.4028/p-I2sYIR
15. Zribi M., Baklouti S. Investigation of phosphate based geopolymers formation mechanism. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. № 562. 120777. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120777
16. Karan R., Pal P., Maiti P., Das K. Structure, properties and in-vitro response of SiO₂-Na₂O-CaO-P₂O₅ system, based glass-ceramics after partial replacement of Na₂O by Li₂O. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2021. № 556. P. 120554. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120554

Надійшла до редколегії: 22.02.2025

Прийнята до друку: 18.04.2025

УДК 519.6

О. Є. Басманов¹, д.т.н., професор, пров. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)

В. В. Олійник¹, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)

Є. В. Мориц², д.т.н., завідувач відділу експертизи (ORCID 0000-0003-0131-2332)

Я. Ю. Кальченко¹, PhD, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3482-0782)

¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

²Державний НДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації, Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНОГО НАПОРУ ВОДИ ПРИ ЇЇ ПОДАЧІ НА ОХОЛОДЖЕННЯ РЕЗЕРВУАРА

Побудовано модель руху водного струменя після виходу з пожежного ствола. Модель спирається на систему лінійного однорідного і лінійного неоднорідного диференціальних рівнянь 2-го порядку з початковими умовами, що описують рух елементарного об'єму води в полі сили тяжіння і враховують опір повітря. Їх розв'язання разом з початковими умовами дає траєкторію руху водного струменя в залежності від горизонтальної і вертикальної складових початкової швидкості струменя. Побудовано залежність напору води від горизонтальної складової швидкості водного струменя на виході з пожежного ствола за умови досягнення струменем заданої точки на стінці резервуара. Показано, що така залежність є опуклою донизу функцією з єдиною точкою мінімуму. Мінімальному напору води відповідає лише одна траєкторія руху струменя, яка досягає заданої точки. Збільшення напору призводить до появи двох можливих траєкторій, одна з яких навісна, а інша може бути як навісною, так і настильною. Показано, що умовою настильності траєкторії є перевищення горизонтальною складовою швидкості певного граничного значення, яке пропорційне відстані до резервуара. Побудовано алгоритм визначення мінімального напору води при подачі в задану точку на стінці резервуара по настильній траєкторії. Алгоритм використовує метод Ньютона для чисельного розв'язання задачі умовної оптимізації. Показано, що для відстані до резервуара (5÷30) м напір води має становити (23÷58) м для резервуарів висотою 12 м і (37÷70) м для резервуарів висотою 18 м. Отримані результати можуть бути використані для визначення місць розташування пожежних стволів для подачі води на охолодження резервуарів при розробці плану локалізації та ліквідації пожежі в резервуарному парку, а також для зменшення витрат води внаслідок розбризкування після удару струменя об стінку резервуара.

Ключові слова: пожежний ствол, подача води на охолодження, траєкторія водного струменя, настильна траєкторія

1. Вступ

Пожежі на складах нафти і нафтопродуктів є одними із найнебезпечніших внаслідок «ефекту доміно», коли одна аварійна подія створює передумови для виникнення наступної [1]. Причиною цього є висока концентрація легкозаймистих і горючих рідин на невеликій площі, що обумовлено технологічними і економічними чинниками. Пожежа нафтопродукту в резервуарі або в розливі призводить до інтенсивного теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти і, зокрема, на інші резервуари. Нагріваючись, сталеві конструкції сусідніх резервуарів можуть досягти температури самозаймання парів нафтопродукту, який в них зберігається. Це може призвести як до вибуху (якщо концентрація парів у газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я), так і до виникнення горіння на дихальних пристроях резервуарів (якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара перевищує верхню концентраційну межу розповсюдження полум'я).

В [2] досліджено 1144 аварії, які мали місце в резервуарних парках з нафтою і нафтопродуктами. Серед них виділено 100 аварій, для яких мав місце ефект доміно. Згідно з [3] близько 44 % масштабних пожеж, в яких спостерігався ефект доміно, починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу. Аналогічний результат наведено і в [4]: пожежі були причиною близько 43 % від загальної Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-10

кількості аварій, в яких мав місце ефект доміно. При цьому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу нафтопродукту. Ще одним негативним наслідком масштабних пожеж є викид небезпечних речовин в атмосферу [5].

Незважаючи на заходи безпеки, що здійснюються, надзвичайні ситуації, пов'язані з розтіканням і горінням рідин на підприємствах і транспорті, все одно траплялися. З початком повномасштабного російського вторгнення в Україну нафтопереробні заводи, склади зберігання нафти і нафтопродуктів стали однією з цілей при ударах по критичній інфраструктурі [6].

Таким чином, актуальною проблемою є розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового впливу на них.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Стосовно об'єктів зберігання, перероблення або транспортування легкозаймистих та горючих рідин реагування на надзвичайні ситуації означає, по-перше, охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з пожежею, а, по-друге, підготовку і проведення пінної атаки для ліквідації пожежі [7]. Але при цьому рекомендовані інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів, що горять, та сусідніх з ними не враховують виду нафтопродукту, що горить, напряму і швидкості вітру, що впливає на щільність теплового потоку від пожежі. В [8] розглянуто охолодження водними струменями резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін резервуара з пожежею і навколишнім середовищем, а також конвекційний теплообмін з водною плівкою, що стікає по стінці резервуара. Але побудована модель охолоджувальної дії водної плівки на стінку резервуара описує лише усталений розподіл температури по стінці резервуара. Поза увагою залишається питання, за яких умов можливий вихід на такий режим. В [9] побудовано модель охолодження стінки резервуара водною плівкою, що спирається на рівняння балансу тепла і маси для водної плівки і враховує википання води. Така плівка може бути утворена як стаціонарними кільцями охолодження на резервуарі, так і шляхом подачі води на стінку резервуара пожежними стволами. Запропонований підхід дає можливість визначити розподіл температури по поверхні резервуара при заданій об'ємній інтенсивності подачі води. Але обернена задача, тобто вибір такої інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження поверхні резервуара до безпечних значень температури, в роботі не розглянута. В [10] відзначено, що немає загальноприйнятих залежностей для визначення наслідків теплового впливу пожежі на резервуар з нафтопродуктом. Це, в свою чергу, ускладнює побудову моделей охолодження резервуарів водою, оскільки мають бути враховані такі параметри, як швидкість вітру, відстань і тип рідини, що горить. З метою зменшення витрат води доцільно використовувати її нерівномірну подачу в залежності від щільності теплового потоку, що припадає на дану ділянку стінки резервуара. Дослідження проведено із використанням пакета моделювання FDS (Fire Dynamics Simulator), що ускладнює узагальнення отриманих результатів та їх використання в умовах, відмінних від даних. В [11] поставлено і розв'язано задачу оптимального вибору інтенсивності подачі води на охолодження резервуара. Її особливістю є нерівномірність подачі води вздовж периметра резервуара. Інтенсивність подачі визначається із умови неперевищення температурою стінки резервуара заданого граничного значення. Але спосіб подачі води залишено поза увагою: одну й ту саму інтенсивність подачі води можна забезпечити як зміною напору, так і зміною діаметра насадки пожежного ствола або кількості пожежних

стволів. В той же час, швидкість струменя в момент удару об стінку істотно впливає на частку води, яка відбивається у вигляді бризок, не приймаючи участі в стінканні по стінці резервуара та її охолодженні. В [12] встановлено, що при великих відстанях від ствола до стінки масова частка розбризкування визначається числом Вебера, яке є пропорційним квадрату швидкості струменя. Але вибір такого напору подачі води, який би мінімізував втрати води внаслідок розбризкування в роботі не розглянуто. В [13] наведено регресійну залежність, що пов'язує відносну масову частку бризок із числом Вебера, із якої випливає, що для чисел Вебера в діапазоні (550÷32500) втрати води внаслідок розбризкування складають (26÷73) %. Але і тут підвищення коефіцієнта використання води шляхом варіації параметрів подачі струмені не досліджено. В [14] експериментально досліджено розбризкування струменя води внаслідок його удару об вертикальну стінку. Досліджено розпад струменя і з'ясовано, що швидкість струменя, при якій досягається максимальна частка бризок, зменшувалася зі збільшенням відстані між вертикальною стінкою і виходом з насадка. Недоліком дослідження є складність розповсюдження отриманих результатів, на умови, що відрізняються від розглянутих у роботі. В [15] експериментально розглянуто розбризкування і розтікання води внаслідок удару струменя об вертикальну стінку. З'ясовано, що підвищення температури стінки призводить до збільшення частки води, що розбризкується. Але малий діаметр сопла (0,7 мм), що був використаний в експериментах, ускладняє узагальнення результатів на випадок пожежних стволів, для яких типовий діаметр складає (13÷50) мм. В [16] експериментально досліджено розпад суцільного водного струменя в процесі його руху. Але поведінку водного струменя при зіткненні з вертикальною стінкою в роботі не розглянуто.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є підвищення коефіцієнта використання води при охолодженні резервуарів, що горять та сусідніх з ними.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення мінімально можливого напору, який забезпечує подачу компактного водного струменя по настільній траєкторії в певну точку на стінці резервуара для її охолодження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- побудувати модель руху водного струменя після виходу з пожежного ствола;
- визначити залежність траєкторії руху струменя від напору води;
- розробити алгоритм розв'язання задачі умовної мінімізації напору води.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес руху водного струменя в повітрі після виходу з пожежного ствола, предметом – параметри, що описують цей рух. Прийнято гіпотезу, що струмінь зберігає свою компактність і не розпилюється внаслідок взаємодії з повітрям, а також, що коефіцієнт опору повітря є сталим. Для інтегрування рівняння руху елементарного об'єму води були використані методи теорії лінійних диференціальних рівнянь. Для розв'язання нерівності, що визначає умову настільності траєкторії руху струменя, біло застосовано графічний метод розв'язання рівнянь. Пошук мінімального значення напору води, що забезпечує досягнення струменем води заданої точки по настільній траєкторії, проводився чисельно за допомогою метода Ньютона. Програмну реалізацію метода було виконано в середовищі Maple 18.

5. Визначення мінімального напору, що забезпечує подачу води в задану точку

5.1. Побудова моделі руху водного струменя після виходу з пожежного ствола

В системі координат, пов'язаній з пожежним стволом, рух водного струменя після виходу зі ствола може бути наближено описаний системою диференціальних рівнянь [17]

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\alpha \frac{dx}{dt}; \quad (1)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\alpha \frac{dz}{dt} - g, \quad (2)$$

де $x(t)$, $z(t)$ – координати елементарного об'єму води через проміжок часу t після виходу з пожежного ствола; α – коефіцієнт опору повітря; g – прискорення сили тяжіння (рис. 1).

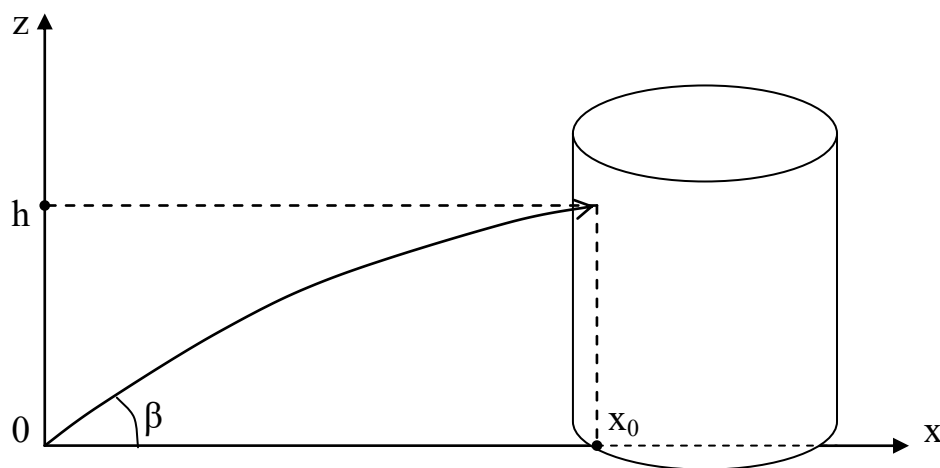


Рис. 1. Рух водного струменя після виходу із пожежного ствола

Система рівнянь (1), (2) разом з початковими умовами

$$x(0) = 0; \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = v_{0x} = v_0 \cos \beta; \quad (3)$$

$$z(0) = 0; \quad \left. \frac{dz}{dt} \right|_{t=0} = v_{0z} = v_0 \sin \beta \quad (4)$$

описує траєкторію руху водного струменя; β – кут нахилу пожежного ствола відносно горизонту; v_0 – швидкість струменя води на виході зі ствола; v_{0x} , v_{0z} – проекції вектора $\vec{v}_0$ на горизонтальну і вертикальну осі відповідно.

Розв'язання неоднорідного диференціального рівняння (2) потребує розв'язання відповідного однорідного рівняння

$$z'' = -\alpha z', \quad (5)$$

характеристичне рівняння якого має вигляд

$$\begin{aligned} r^2 + \alpha r &= 0; \\ r_1 &= 0; \quad r_2 = -\alpha. \end{aligned}$$

Це дозволило записати загальний розв'язок однорідного рівняння (5):

$$z(t) = C_1 + C_2 e^{-\alpha t},$$

де C_1, C_2 – сталі. Частинний розв'язок неоднорідного рівняння (2) шукався у вигляді

$$z_p = At,$$

де A – стала, яку було визначено шляхом підстановки частинного розв'язку в неоднорідне рівняння (2):

$$\begin{aligned} 0 &= -\alpha A - g; \\ A &= -\frac{g}{\alpha}; \\ z_p &= -\frac{g}{\alpha} t. \end{aligned}$$

Тоді загальний розв'язок неоднорідного рівняння (2):

$$z(t) = C_1 + C_2 e^{-\alpha t} - \frac{g}{\alpha} t. \quad (6)$$

Підстановка (6) в початкові умови (4) дала систему рівнянь відносно невідомих сталих C_1, C_2

$$\begin{cases} z(0) = C_1 + C_2 = 0; \\ z'(0) = -\alpha C_2 - \frac{g}{\alpha} = v_{0z}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} C_1 = \frac{v_{0z}}{\alpha} + \frac{g}{\alpha^2}; \\ C_2 = -\frac{v_{0z}}{\alpha} - \frac{g}{\alpha^2}; \end{cases}$$

Після підстановки цих значень вираз (6) набув вигляду

$$z(t) = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha^2} [1 - \exp(-\alpha t)] - \frac{gt}{\alpha}. \quad (7)$$

Застосування аналогічного підходу до розв'язання диференціального рівняння (1) з початковими умовами (3) дало

$$x(t) = \frac{v_{0x}}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha t)]. \quad (8)$$

Із (8) випливає, що

$$1 - \exp(-\alpha t) = \frac{\alpha x}{v_{0x}}; \quad (9)$$

$$t = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha x}{v_{0x}} \right). \quad (10)$$

Підстановка (9) і (10) у (7) дозволила отримати опис траєкторії руху струменя в явному вигляді

$$z(x) = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha v_{0x}} x + \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x}{v_{0x}} \right), \quad (11)$$

При цьому початкова швидкість v_{0x} і горизонтальна координата x пов'язані умовою

$$v_{0x} - \alpha x > 0. \quad (12)$$

Невиконання умови (12) означає недосяжність точки з горизонтальною координатою x при горизонтальній складовій v_{0x} початкової швидкості струменя води.

5. 2. Визначення залежності траєкторії руху струменя від напору води

Нехай точка прицілювання на стінці резервуара знаходиться на відстані x_0 по горизонталі і h по висоті відносно пожежного ствола (рис. 1). Із (11) і (12) випливає, що умовою попадання водного струменя в точку (x_0, h) є

$$h = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha v_{0x}} x_0 + \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right); \quad (13)$$

$$v_{0x} - \alpha x_0 > 0.$$

Із даної умови було отримано залежність вертикальної складової швидкості водного струменя від її горизонтальної складової

$$z'' = -\alpha z', \quad (5)$$

$$v_{0z} = \frac{v_{0x}}{x_0} \left[h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right] - \frac{g}{\alpha}. \quad (14)$$

Об'єднання виразів для вертикальної і горизонтальної складових початкової швидкості дало вираз для квадрата початкової швидкості v_0

$$v_0^2 = v_{0x}^2 + v_{0z}^2, \quad (15)$$

$$v_0^2 = v_{0x}^2 + \left[\frac{v_{0x}}{x_0} \left(h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) - \frac{g}{\alpha} \right]^2. \quad (16)$$

Початкова швидкість струменя води v_0 пов'язана з напором H на виході з насадка співвідношенням

$$v_0^2 = 2gH. \quad (17)$$

Тоді напір води на виході з насадка пожежного ствола, який забезпечує подачу води у точку (x_0, h) , має вигляд

$$H = \frac{v_{0x}^2}{2g} + \frac{1}{2g} \left[\frac{v_{0x}}{x_0} \left(h - \frac{g}{\alpha^2} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) - \frac{g}{\alpha} \right]^2. \quad (18)$$

Вертикальні сталеві резервуари місткістю від 1000 до 5000 м³ мають висоту 12 м, а резервуари місткістю від 10000 до 50000 м³ – 18 м [18]. На рис. 2 проілюстровано залежність (18) для різних значень відстані x_0 від ствола до резервуара. При цьому висоту подачі біло прийнято $h=12$ м, а коефіцієнт опору повітря $\alpha=0,6$ с⁻¹.

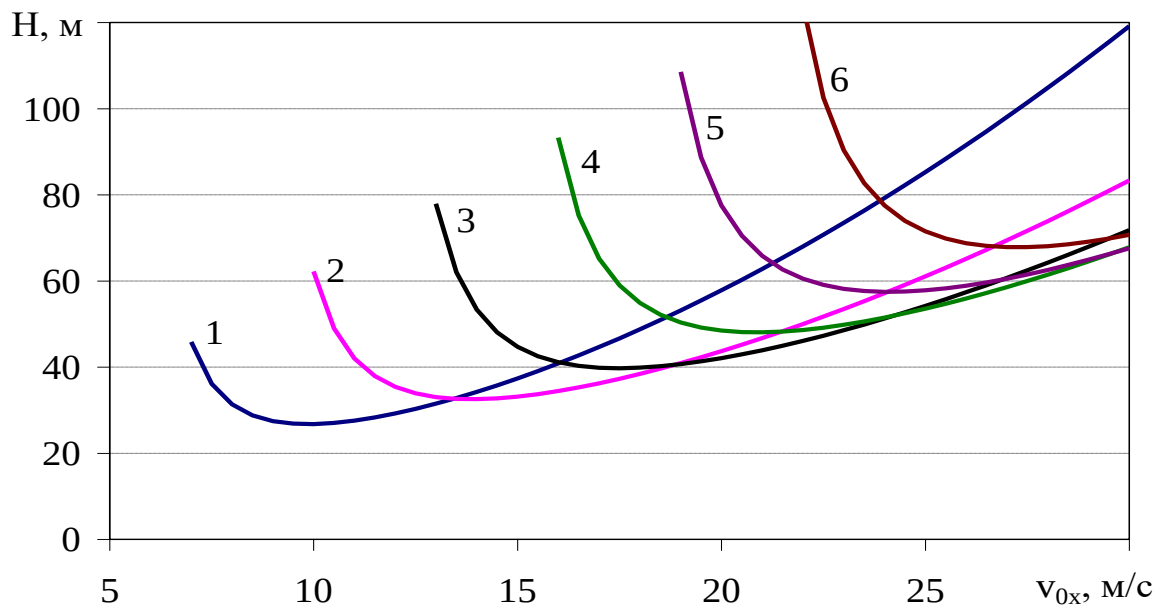


Рис. 2. Залежність напору води на виході з насадка від горизонтальної складової швидкості при подачі в точку на стінці резервуара на висоті 12 м для різних значень відстані до резервуара: 1 – $x_0=10$ м; 2 – $x_0=15$ м; 3 – $x_0=20$ м; 4 – $x_0=25$ м; 5 – $x_0=30$ м; 6 – $x_0=35$ м

Аналіз залежностей, наведених на рис. 2, свідчить, що для даної відстані між стволом і резервуаром існує мінімальне значення напору води, при якому вода досягає заданої точки на стінці резервуара.

Складові вектора швидкості струменя води в момент удару об стінку резервуара визначаються шляхом диференціювання виразів (7) і (8) за t

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v_{0x} \exp(-\alpha t); \quad (19)$$

$$v_z = \frac{dz}{dt} = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha} \exp(-\alpha t) - \frac{g}{\alpha}, \quad (20)$$

де час t досягнення точки прицілювання обчислювався за допомогою

$$t = -\frac{1}{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right). \quad (21)$$

Підстановка (21) в (19) і (20) дала

$$v_x = v_{0x} - \alpha x_0$$

$$v_z = \frac{\alpha v_{0z} + g}{\alpha} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g}{\alpha} = v_{0z} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g x_0}{v_{0x}}. \quad (22)$$

На рис. 3 показано вплив напору води на горизонтальну v_x і вертикальну v_z складові швидкості струменя в момент удару об стінку резервуара на висоті 12 м і відстані 10 м.

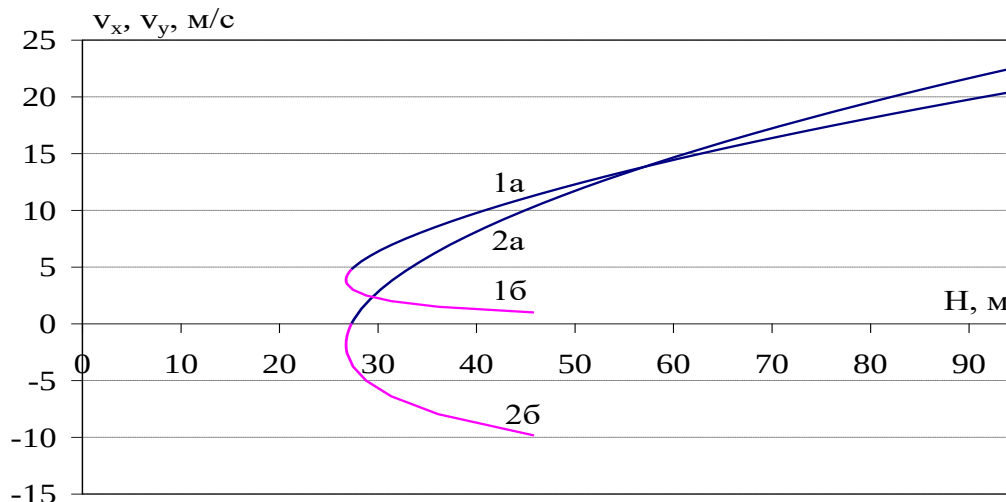


Рис. 3. Залежність горизонтальної (1) і вертикальної (2) складових швидкості струменя в кінцевій точці ($x_0=10$ м, $h=12$ м) від напору води: а – настільна траєкторія; б – навісна траєкторія

Аналіз графічних залежностей на рис. 3 свідчить, що існує мінімальна величина напору, при якій струмінь досягає заданої точки на стінці резервуара. При збільшенні напору з'являються дві можливих траєкторії руху струменя, причому починаючи з деякого значення H^* одна з траєкторій стає настільною (а), а інша – навісною (б).

Із (22) випливає умова, коли траєкторія є настільною

$$v_z = v_{0z} \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) - \frac{g x_0}{v_{0x}} > 0;$$

$$v_{0z} > \frac{gx_0}{v_{0x} - \alpha x_0}.$$

Із врахуванням (15) і (17) остання нерівність перетворилася на

$$H > \frac{gx_0^2}{2(v_{0x} - \alpha x_0)^2} + \frac{v_{0x}^2}{2g},$$

що після підстановки (18) дало

$$\frac{v_{0x}}{\alpha x_0} \left(\frac{\alpha^2 h}{g} - \ln \left(1 - \frac{\alpha x_0}{v_{0x}} \right) \right) > \frac{v_{0x}}{v_{0x} - \alpha x_0}. \quad (23)$$

Нехай

$$y = \frac{\alpha x_0}{v_{0x}}. \quad (24)$$

Це дозволило перетворити (23) на

$$\begin{aligned} \frac{1}{y} \left(\frac{\alpha^2 h}{g} - \ln(1-y) \right) &> \frac{1}{1-y}; \\ \frac{y}{1-y} + \ln(1-y) &< \frac{\alpha^2 h}{g}. \end{aligned} \quad (25)$$

Отримана нерівність являє собою умову настільного характеру траєкторії руху струменя. Ліва частина нерівності (25) є монотонною функцією на півінтервалі $[0; 1)$ і прямує до нескінченності при наближенні y до 1 (рис. 4).

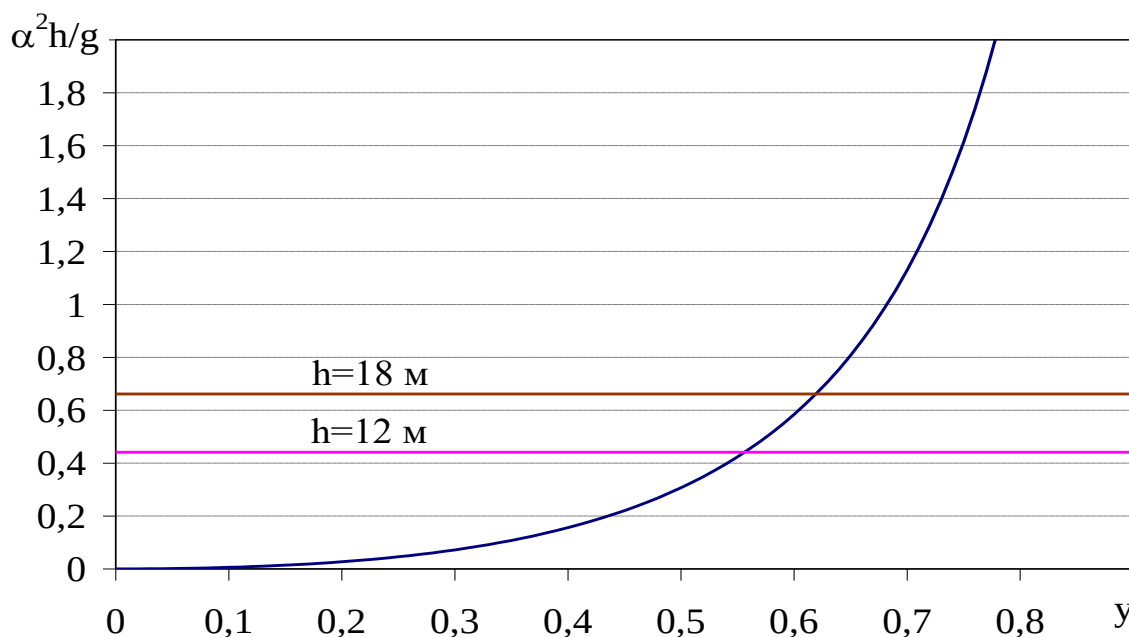


Рис. 4. Графічний розв'язок нерівності (25) при $\alpha=0,6 \text{ с}^{-1}$

Це означає, що існує єдиний розв'язок у* рівняння

$$\frac{y}{1-y} + \ln(1-y) = \frac{\alpha^2 h}{g}; y \in [0;1], \quad (26)$$

а умовою настильності траєкторії є виконання нерівності

$$v_{0x} > v_{0x}^{(H)} = \frac{\alpha x_0}{y^*}. \quad (27)$$

Зокрема, при $\alpha=0,6 \text{ с}^{-1}$ і $h=12 \text{ м}$ розв'язком рівняння (26) є $y_{12}=0,56$, а при $h=18 \text{ м}$ – $y_{18}=0,62$. Тоді мінімальні значення горизонтальної складової початкової швидкості струменя дорівнюють:

$$\begin{aligned} v_{\text{ох наст}} &= 1,07x_0, \quad h = 12 \text{ м}; \\ v_{\text{ох наст}} &= 0,97x_0, \quad h = 18 \text{ м}. \end{aligned}$$

Виконання нерівності

$$v_{0x} > v_{\text{ох наст}} \quad (28)$$

забезпечує настильну траєкторію руху струменя води. Підстановка у формулу (18) значення v_{0x} , що задовольняє нерівності (28), дає величину напору H , якій відповідає настильна траєкторія.

5.3. Розробка алгоритму розв'язання задачі умовної мінімізації напору води

Вираз (18) являє собою залежність напору води на виході з насадка від горизонтальної складової швидкості водного струменя. При цьому умовою досяжності струменем стінки резервуара є нерівність (12), умовою настильності траєкторії – нерівність (28). Отже існує певний діапазон значень напору і кута подачі струменя, що забезпечують потрапляння струменя в задану точку по настильній траєкторії. Серед всіх можливих значень напору важливою є мінімальна величина напору, при якому точка (x_0, h) на поверхні резервуара є досяжною настильній траєкторії:

$$H_{\min} = \min_{v_{0x}} H(v_{0x}). \quad (29)$$

Складність функції (18) не дозволяє знайти розв'язок задачі (29) аналітичними методами. Тому її розв'язання було виконано чисельно із застосування методу Ньютона. Його сутність полягає в наступному.

1. Обрати початкове значення горизонтальної складової початкової швидкості струменя

$$v_{0x}^{(0)} = \max\{v_{\text{ох наст}}; \alpha x_0 + 0,1\}. \quad (30)$$

2. Обрати точність обчислення ε для горизонтальної складової швидкості струменя.

3. Покласти $k=1$.

4. Обчислити

$$v_{0x}^{(k)} = \max \left\{ v_{0x}^{(k-1)} - \frac{H' \left(v_{0x}^{(k-1)} \right)}{H'' \left(v_{0x}^{(k-1)} \right)}; v_{0x \text{ наст}} \right\}. \quad (31)$$

5. Якщо

$$\left| v_{0x}^{(k)} - v_{0x}^{(k-1)} \right| < \varepsilon,$$

то перейти до кроку 7.

6. Покласти $k=k+1$ і перейти до кроку 4.

7. Покласти

$$v_{0x}^{(\min)} = v_{x0}^{(k)}; H_{\min} = H \left(v_{0x}^{(\min)} \right).$$

В якості приклада на рис. 5 наведено результати розрахунків мінімального напору для подачі води по настільній траєкторії на висоту 12 м (РВС-1000 – РВС-5000) і на висоту 18 м (РВС-10000 – РВС-50000). Значення коефіцієнту опору повітря $\alpha = 0,6 \text{ с}^{-1}$.

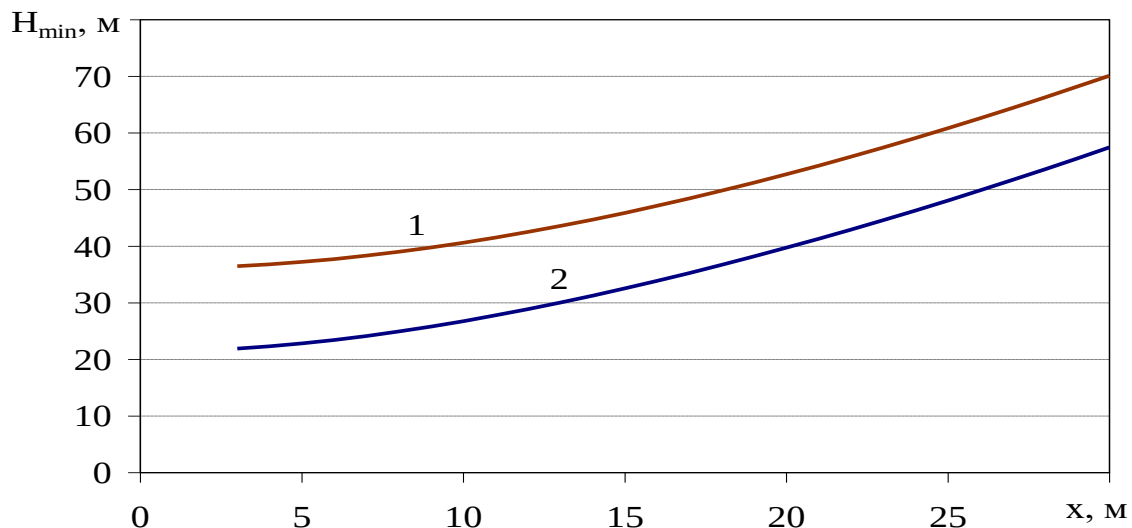


Рис. 5. Залежність напору води для подачі на охолодження стінки резервуара від відстані до нього: 1 – на висоту 18 м; 2 – на висоту 12 м

Залежності, наведені на рис. 5, дають мінімальні значення напору. При їх практичному використанні доцільно обирати дещо більші значення, щоб компенсувати похибки моделі, похибки оцінки відстані, вплив вітру тощо. В той же час, бажано не перевищувати істотно ці значення, оскільки чим більшою є швидкість струменя в момент удару об стінку, тим більша частка води втрачається внаслідок відбиття від стінки.

6. Обговорення результатів визначення мінімального напору, що забезпечує подачу води в задану точку

Недоліком подачі води на охолодження стінки резервуара за допомогою

стаціонарних гідромоніторів або пожежних стволів з пересувної техніки є те, що частина води відбивається від стінки при ударі струменя об неї. Це призводить до того, що ця частина води втрачається, не приймаючи участі в охолодженні. Величина коефіцієнта використання води (відношення об'єму води, що стікає по стінці, до загального об'єму поданої води) залежить від швидкості струменя в момент удару об стінку і кута, який струмінь утворює зі стінкою. Низка експериментальних досліджень свідчить, що для типових швидкостей струменя коефіцієнт використання води складає близько $(30 \div 70) \%$. Одним із шляхів підвищення величини коефіцієнта використання води є зменшення швидкості струменя в точці його удару об стінку резервуара.

Для побудови траєкторії руху водного струменя розглянуто рух елементарного об'єму води в полі сили тяжіння з урахуванням опору повітря – рівняння (1–2). При цьому припускається, що сила опору повітря пропорційна швидкості руху струменя, а коефіцієнт опору є сталим [17]. Систему координат обрано таким чином, що її початок співпадає з пожежним стволом, а вісь z направлена вертикально вгору (рис. 1). Система рівнянь (1), (2) разом з початковими умовами (3), (4) описує рух елементарного об'єму води після виходу з пожежного ствола, а значить, дає можливість визначити траєкторію водного струменя. Рівняння (1), (2) є лінійними диференціальними рівняннями, при цьому (1) – однорідне рівняння, а (2) – неоднорідне. Застосування загального методу розв'язку зазначеного типу рівнянь дало можливість отримати розв'язання задачі (1–4) у вигляді залежностей просторових координат (7), (8) від часового параметра t . Шляхом вираження часового параметра через горизонтальну координату x (перетворення (9), (10)) було отримано залежність вертикальної координати точки на траєкторії струменя від горизонтальної координати у вигляді (11). Її аналіз свідчить, що доступний діапазон досяжності струменя по горизонталі обмежений нерівністю (12).

Для того, щоб струмінь води досяг певної точки на стінці вертикального сталевго резервуара, необхідним і достатнім є виконання умови (13), що накладає обмеження на значення вертикальної і горизонтальної складових вектора швидкості струменя води на виході зі ствола. Вираз в явному вигляді для вертикальної складової швидкості (14) дозволив одержати співвідношення (16), що пов'язує швидкість водного струменя на виході з пожежного ствола з горизонтальною складовою за умови досягнення заданої точки на стінці резервуара. Загальноприйнятою характеристикою подачею води зі ствола є її напір. Напір води пов'язаний зі швидкістю її виходу зі ствола співвідношенням (17). Це дозволило отримати залежність напору води від горизонтальної складової її швидкості на виході зі ствола (18) за умови, що струмінь досягає заданої точки на стінці резервуара. Аналіз графічних залежностей на рис. 2 свідчить, що існує певне значення горизонтальної складової швидкості, яке відповідає мінімальному значенню напору води. Зменшення горизонтальної швидкості буде означати більший кут нахилу ствола β відносно горизонту (рис. 1). Збільшення горизонтальної складової швидкості буде означати зменшення кута нахилу ствола відносно горизонту. Отже, мінімально можливому напору води відповідає лише одна траєкторія руху струменя, при якій задана точка на стінці резервуара є досяжною, в той час як при більших значеннях напору можливі дві траєкторії. При подальшому збільшенні напору одна з траєкторій матиме настільний вид, а інша – навісний (рис. 3). Навісним траєкторіям відповідають такі значення напору, при яких вертикальна складова швидкості в момент удару об стінку резервуара є від'ємною (рис. 3). Аналіз

залежностей на рис. 3 свідчить, що при навісній траєкторії горизонтальна складова швидкості в момент контакту зі стінкою є меншою, ніж при настільній траєкторії. Модуль швидкості також є меншим при навісній траєкторії. В той же час, для практичного використання більш зручною є настільна траєкторія. Характер траєкторії струменя визначається співвідношенням між горизонтальною і вертикальною складовими вектора швидкості струменя на виході зі ствола, а також відстанню по горизонталі до точки прицілювання – нерівність (25). Графічне розв'язання зазначеної нерівності (рис. 4) дозволяє визначити граничне значення горизонтальної складової початкової швидкості водного струменя, при перевищенні якого траєкторія водного струменя буде мати настільний характер – формула (27).

Задача пошуку мінімально можливого напору води, що забезпечує досягнення певної точки по настільній траєкторії, є задачею мінімізації (29). Особливістю функції (18) є її опуклість донизу і наявність одного екстремуму, а саме, мінімуму (рис. 2). Це дозволяє ефективно застосувати такий чисельний метод оптимізації як метод Ньютоні. Починаючи з деякого початкового значення горизонтальної складової швидкості (30) за допомогою ітераційної процедури (31) визначається величина горизонтальної складової швидкості, що забезпечує мінімальне значення напору води (29).

Величина необхідного напору зростає із збільшенням відстані і висоти точки подачі (рис. 5). При практичному використанні отриманих залежностей необхідно обирати дещо більші значення, оскільки при розрахованих значеннях тиску струмін води буде мати нульову швидкість в момент зіткнення зі стінкою. В той же час істотне перевищення напору призведе до зменшення коефіцієнта використання води внаслідок збільшення частки води, що розбризкується після удару струменя о стінку. В якості орієнтовної величини напору доцільно наведені на рис. 5 значення збільшити на $(5 \div 10) \%$.

Запропонована модель може бути застосована при побудові планів реагування на надзвичайні ситуації, пов'язані з горінням горючих рідин на складах нафти і нафтопродуктів.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він припускає компактну форму водного струменя від виходу з насадка пожежного ствола і до досягнення стінки резервуара. В дійсності має місце розпилення струменя, яке збільшується із збільшенням напору.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з врахуванням часткового розпилення водного струменя.

7. Висновки

1. Побудовано модель руху елементарного об'єму води в полі сили тяжіння за умови сталого значення коефіцієнта опору повітря. Модель являє собою систему лінійних однорідного і неоднорідного диференціальних рівнянь 2-го порядку з початковими умовами, що описують координати пожежного ствола і швидкість струменя на виході з нього. Інтегрування зазначеної системи рівнянь дозволяє визначити траєкторію руху струменя води в залежності від горизонтальної і вертикальної складових початкової швидкості струменя.

2. Показано, що залежність напору від горизонтальної складової початкової швидкості струменя води за умови досягнення струменем заданої точки є опуклою донизу функцією з єдиною точкою екстремуму – мінімумом. При збільшенні напору вище мінімального значення, що забезпечує подачу води в задану точку, є

дві можливих траєкторії руху водного струменя – настільна і навісна. З'ясовано, що при навісній траєкторії модуль швидкості водного струменя в момент удару є меншим порівняно з настільною траєкторією. Показано, що умовою настільності траєкторії є перевищення горизонтальною складовою початковою швидкості деякого граничного значення, яке є пропорційним відстані до резервуара. Для резервуарів висотою 12 м (РВС-1000 – РВС-5000) коефіцієнт пропорційності складає $0,97 \text{ с}^{-1}$, а для резервуарів висотою 18 м (РВС-10000 – РВС-50000) – $1,07 \text{ с}^{-1}$.

3. Побудовано алгоритм розрахунку мінімально можливого напору подачі води на охолодження резервуара в залежності від відстані до точки прицілювання по горизонталі і вертикалі. Зміст алгоритму полягає у використанні методу Ньютона для чисельного розв'язання задачі мінімізації напору води за умови досягнення водним струменем певної точки по настільній траєкторії. Показано, що для резервуарів з висотою стінки 12 м напір води має становити $(23 \div 58)$ м при відстані до резервуара $(5 \div 30)$ м, а для резервуарів з висотою стінки 18 м – $(37 \div 70)$ м для такого самого діапазону значень відстані до резервуара.

Література

1. Khan F. I., Abbasi S. A. An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2001. Vol. 14(4). P. 283–306. doi: 10.1016/S0950-4230(00)00048-6
2. Yang R., Khan F., Neto E. T., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*. 2020. Vol. 202. P. 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
3. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
4. Amin M. T., Scarponi G. E., Cozzani V., Khan F. Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*. 2024. Vol. 242. P. 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2019. Vol. 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
6. Одинець А., Ніжник В., Сізіков О., Фещук Ю., Балло Я., Климась Р., Жихарев О. Обґрунтування додаткових заходів щодо оперативних дій під час гасіння пожеж на складах нафтопродуктів в умовах бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 1(13). С. 72–79. doi: 10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79
7. НАПБ 05.035 – 2004. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. URL; https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnnya_pozhezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf
8. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669.
9. Basmanov O., Oliinyk V., Afanasenko K., Hryhorenko O., Kalchenko Y. Developing the model of water cooling an oil tank in the case of fire. *Eastern-European*

Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 5/10(131). P. 53–61. doi: 10.15587/1729-4061.2024.313827

10. Saber A., El-Nasr M. A., Elbanhawey A. Y. Generalized formulae for water cooling requirements for the fire safety of hydrocarbon storage tank farms. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2022. Vol. 80. P. 104916. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104916

11. Oliinyk V., Basmanov O., Shevchenko O., Khmyrova A., Rushchak I. Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2025. Vol. 1/10(133). P. 45–51. doi: 10.15587/1729-4061.2025.323197

12. Wassenberg J. R., Stephan P., Gambaryan-Roisman T. The influence of splattering on the development of the wall film after horizontal jet impingement onto a vertical wall. Experiments in Fluids. 2019. Vol. 60(11). doi: 10.1007/s00348-019-2810-6

13. Qian S., Zhu D. Z., Xu H. Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate. Experimental Thermal and Fluid Science. 2022. Vol. 130. P. 110518. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110518

14. Kim H., Choi H., Kim D., Chung J., Kim H., Lee K. Experimental study on splash phenomena of liquid jet impinging on a vertical wall. Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. Vol. 116. P. 110111. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110111

15. Hu B., Zhao T., Shi Z., Li W., Lin Q., Liu H., Wang F. Spreading and splashing of liquid film on vertical hot surface by inclined jet impingement. Experimental Thermal and Fluid Science. 2024. Vol. 154. P. 111147. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111147

16. Liu X., Wang J., Li B., Li W. Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. The Journal of Engineering. 2018. Vol. 2019(13). P. 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950

17. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Khyzhnyak A. Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance. EUREKA: Physics and Engineering. 2020. Vol. 5. P. 51–59. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001400

18. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови.

O. Basmanov¹, DSc, Professor, Leading Researcher of the Department

V. Oliinyk¹, PhD, Associated Professor, Head of Department

Ye. Morshch², DSc, Head of the Department of Scientific and Technical Expertise

Y. Kalchenko¹, PhD, Associate Professor of the Department

¹National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

²State Research Institute of Cybersecurity and Information Protection Technologies, Kyiv, Ukraine

DETERMINING THE MINIMUM WATER PRESSURE FOR SUPPLYING IT FOR COOLING THE TANK

A model of the water jet motion after exiting the fire nozzle has been constructed. The model is based on a system of linear homogeneous and linear inhomogeneous 2nd-order differential equations with initial conditions that describe the motion of an elementary volume of water in a gravitational field and take into account air drag. Their solving with the initial conditions gives the trajectory of the water jet motion depending on the horizontal and vertical components of the initial jet velocity. The dependence of the water pressure on the horizontal component of the water jet velocity at the fire nozzle provided that the jet reaches a given point on the tank shell has been constructed. It is shown that the dependence is a downward convex function with a single minimum point. Only one trajectory of the jet

Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-10

motion corresponds to the minimum water pressure, which reaches a given point. An increase in the pressure leads to the appearance of two possible trajectories, one of which is grazing, and the other can be grazing or flat. It is shown that the condition for the trajectory to be flat is that the horizontal component of the velocity exceeds a certain limit value that is proportional to the distance to the tank. An algorithm for determining the minimum water pressure for supplying to a given point on the tank shell by a flat trajectory is constructed. The algorithm uses Newton's method to numerically solve the conditional optimization problem. It is shown that for a distance to the tank ($5 \div 30$) m the water pressure should be ($23 \div 58$) m for tanks 12 m high and ($37 \div 70$) m for tanks 18 m high.

The obtained results can be used to determine the locations of fire nozzles for supplying water to cool tanks while developing a plan for localizing and eliminating fires in a oil tank storage and to reduce water losses due to the splattering of the jet after hitting the tank.

Keywords: fire nozzle, cooling water supply, water jet trajectory, flat trajectory

References

1. Khan, F. I., Abbasi, S. A. (2001). An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14(4), 283–306. doi: 10.1016/S0950-4230(00)00048-6
2. Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R., Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? *Reliability Engineering & System Safety*, 202, 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976
3. Reniers, G., Cozzani, V. (2013). Features of Escalation Scenarios. *Domino Effects in the Process Industries*, 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8
4. Amin, M. T., Scarponi, G. E., Cozzani, V., Khan, F. (2024). Improved pool fire-initiated domino effect assessment in atmospheric tank farms using structural response. *Reliability Engineering & System Safety*, 242, 109751. doi: 10.1016/j.ress.2023.109751
5. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99
6. Odynets, A., Nizhnyk, V., Sizikov, O., Feschuk, Y., Ballo, Y., Klymas, R., Zhykharev, O. (2022). Justification of additional measures for operational actions during fire extinguishing in petroleum products warehouses in conditions of combat. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, (1(13)), 72–79. doi: 10.33269/nvcz.2022.1(13).72-79
7. NAPB 05.035 – 2004. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and petroleum products.
8. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A., Yashchenko, O. (2019). Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(97)), 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669
9. Basmanov, O., Oliinyk, V., Afanasenko, K., Hryhorenko, O., Kalchenko, Y. (2024). Building a model of oil tank water cooling in the case of fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(10(131)), 53–61. doi: 10.15587/1729-4061.2024.313827
10. Saber, A., El-Nasr, M. A., Elbanhawy, A. Y. (2022). Generalized formulae for water cooling requirements for the fire safety of hydrocarbon storage tank farms. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 80, 104916. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104916

11. Oliinyk, V., Basmanov, O., Shevchenko, O., Khmyrova, A., Rushchak, I. (2025). Building a model of choosing water supply rate to cool a tank in the case of a fire. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(133)), 45–51. doi: 10.15587/1729-4061.2025.323197
12. Wassenberg, J. R., Stephan, P., Gambaryan-Roisman, T. (2019). The influence of splattering on the development of the wall film after horizontal jet impingement onto a vertical wall. *Experiments in Fluids*, 60(11). doi: 10.1007/s00348-019-2810-6
13. Qian, S., Zhu, D. Z., Xu, H. (2022). Splashing generation by water jet impinging on a horizontal plate. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 130, 110518. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2021.110518
14. Kim, H., Choi, H., Kim, D., Chung, J., Kim, H., Lee, K. (2020). Experimental study on splash phenomena of liquid jet impinging on a vertical wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 116, 110111. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110111
15. Hu, B., Zhao, T., Shi, Z., Li, W., Lin, Q., Liu, H., Wang, F. (2024). Spreading and splashing of liquid film on vertical hot surface by inclined jet impingement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 154, 111147. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111147
16. Liu, X., Wang, J., Li, B., Li, W. (2018). Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. *The Journal of Engineering*, 2019(13), 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950
17. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Khyzhnyak, A. (2020). Estimating the influence of the wind exposure on the motion of an extinguishing substance. *EUREKA: Physics and Engineering*, 5, 51–59. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001400
18. DSTU B V.2.6-183:2011. Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. General technical conditions.

Надійшла до редколегії: 28.02.2025

Прийнята до друку: 21.04.2025

УДК 514.18

А. Я. Калиновський, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)

Л. М. Куценко, д.т.н., професор (ORCID 0000-0003-1554-8848)

О. І. Сухарькова, викл. каф. (ORCID 0000-0003-1033-4728)

С. Ю. Назаренко, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-0891-0335)

О. О. Дячков, к.е.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-7978-0024)

Ю. М. Гринько, к.держ.упр., викл. каф. (ORCID 0000-0003-1957-025X)

Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ В УМОВАХ НЕВАГОМОСТІ РОЗКРИТТЯ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ЯК БАГАТОЛАНКОВИХ МАЯТНИКІВ

Розглянуто геометричне моделювання стержневих конструкцій в умовах невагомості шляхом дослідження елементів їх каркасів, складених з багатоланкових маятників. Наведено геометричну модель розкриття таких конструкцій із урахуванням імпульсного впливу реактивних двигунів, встановлених на прикінцевих точках ланок. Механізм розкриття ґрунтується на ініціюванні інерційного руху без зовнішнього контролю після короткочасного імпульсного впливу. Динаміка процесу розкриття описана за допомогою рівнянь Лагранжа другого роду, причому особливу увагу приділено адаптації формулювання до умов мікрогравітації, де значення потенціальної енергії можна вважати близькою до нуля. Це забезпечує практично точне моделювання розкриття конструкцій виключно під дією кінетичної енергії, без подальшого зовнішнього керування. В результаті дії імпульсів розкриття маятника відбувається за інерцією. Звідси зрозумілим є вибір терміну «інерційний спосіб розкриття каркасу». Розроблено математичні моделі та методику одержання комп'ютерної анімації для прогнозування положення ланок у часі й визначення моменту фіксації (стоп-коду) бажаного положення конструкції. Досліджено похибки імпульсних впливів на точність розкриття і встановлено допустимі межі відхилення для збереження прийнятної форми стержневої конструкції. Наведено тестові приклади розкриття дволанкових і чотириланкових маятників, а також спеціальних конфігурацій – магдебурзького маятника і маятника Томсона-Тета. Одержані результати доцільно використовувати в режимі анімації для унаочнення динаміки формування стержневих конструкцій. Проілюструвати розкриття силових каркасів для сонячних дзеркал чи космічних антен. Ці підходи дозволяють спростити технології керування розкриттям об'єктів без потреби в складних електромеханічних приводах, що особливо важливо для зниження маси і вартості космічних місій.

Ключові слова: стержнева конструкція, процес розкриття у невагомості, багатоланковий маятник, рівняння Лагранжа

1. Вступ

Керування розкриттям стержневих конструкцій у невагомості є складною задачею механіки [1–4]. Під поняттям «стержнева конструкція» далі розуміємо геометричне тіло, складене зі стержнів, довжини яких значно перевищують їх інші розміри. Для розрахунків геометричної форми послідовних фаз розкриття «маятникових» конструкцій, складених зі стержнів, слід використати дослідження, присвячених динаміці багатоланкових маятників [5–8]. Це пов'язано з адаптуванням до невагомості процесу коливання багатоланкового маятника як геометричної моделі розкриття каркасу об'єкта. В результаті прийдемо до необхідності робіт, присвячених можливості застосування рівнянь Лагранжа другого роду для механічних систем у невагомості [9].

До позаземного простору невагомості комплекти стержнів доставляються у складеному вигляді (як касети), після чого виконується операція розкриття стержнів для надання робочої форми всій конструкції. Розрахунок стержневих конструкцій такого класу пропонується здійснювати на основі Лагранжевої динаміки багатоланкових маятників як консервативної системи. Це дозволить одержати геомет-

ричні моделі послідовних фаз (анімації) розкриття стержневих конструкцій з врахуванням їх динамічних властивостей. Застосування таких моделей на етапі проектування допоможе при подальших дослідженнях розрахувати параметри функціонування конструкції в цілому.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [10] розглядаються методи керування трансформацією гнучких космічних маніпуляторів, зокрема у контексті стабільності та ефективності розкриття. Особливо цінною є увага до мультизв'язкових систем, подібних до маятникових механізмів, що підкреслює потребу у складному геометричному й динамічному моделюванні для забезпечення надійності в умовах мікрогравітації. В роботі [11] розглядається процес складання та розгортання композитних конструкцій зі замкненим поперечним перерізом типу Dual-Matrix. У роботі [12] розглядається створення й моделювання матеріалів з високим рівнем деформації для розгортання космічних конструкцій. На практиці більш вживаними є каркасні тросові системи розкриття. У роботах [13] наведені математичні моделі процесу розкриття багатоланкової каркасної конструкції сонячної батареї із тросовою системою синхронізації. На схемах розкриття конструкції за допомогою електродвигунів та тросів здійснюється синхронізація зміни величин кутів між суміжними ланками. Для створення спеціальних конструкцій застосовуються багатопланові композити, які мають високу жорсткість та здатність зберігати форму після багаторазових згинань [14, 15]. Вибір матеріалів для ланок конструкції варіюється від вуглецевих волокон до полімерних матеріалів, які дозволяють досягти оптимального співвідношення між міцністю та вагою [16, 17].

Прототипом розглянутого у роботі способу розкриття багатоланкової стержневої конструкції є тросова система [18–20]. У роботах [21, 22] започатковано геометричну модель розкриття на уявній площині у невагомості стержневої конструкції як багатоланкового маятника. Вважалося, що рушіями розкриття є реактивні імпульсні двигуни, встановлені на прикінцевих точках ланок. В роботах [23–25] наведено відомі схеми розкриття стержневих конструкцій.

В результаті огляду виявлені питання, ще не досліджені іншими авторами, що дозволило сформулювати наступну проблему досліджень. Для реалізації ідеї розгортання багатоланкових конструкцій у невагомості необхідно дослідити інерційну систему розкриття для конкретних маятників, де ініціювання коливань здійснюється імпульсами реактивних двигунів. Тут імпульси мають впливати на певні вузлові елементи конструкції. Необхідно дослідити прояви можливих похибок величин імпульсів. А також розглянути питання фіксації елементів багатоланкової конструкції в наперед розрахованому розгорнутому стані. Дослідження провести з використанням комп'ютерної анімації для елементів стержневих конструкцій.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є опис у вигляді алгоритму розкриття стержневого каркасу в умовах невагомості як геометричних моделей коливання конкретних багатоланкових маятників. У нашому випадку для прикладу: подвійного, чотириланкового, магдебурзького та маятника Томсона-Тета. Вважається, що розкриття конструкції здійснюється завдяки імпульсам реактивних двигунів, які діють на прикінцеві точки (тобто вузли) ланок маятника.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення наступних завдань:

- розробити геометричні моделі процесу розкриття двохланкових маятників;
- розробити геометричні моделі процесу розкриття чотириланкових маятників;
- розробити геометричні моделі процесу розкриття магдебурзького маятника;
- розробити геометричні моделі процесу розкриття маятника Томсона-Тета.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом досліджень є механічні конструкції спеціального призначення, утворені системою взаємопов'язаних стержнів, і які орієнтовані на експлуатацію в умовах невагомості. Предметом досліджень є опис множини стержнів як каркасу конструкції, кожний елемент якої має вигляд багатоланкового маятника. Гіпотеза досліджень полягає у можливості наближення форми конструкції зі значенням потенціальної енергії близькою до нуля. Тому на стержневу конструкцію впливатимуть лише параметри її кінетичної енергії.

Методи дослідження:

- для ініціювання коливань обираються імпульсні реактивні двигуни, встановлені на прикінцевих точках ланок маятника;
- складається система рівнянь Лагранжа другого роду, розв'язками якої є початкові кути відхилень, а також швидкості, наданих кутам відхилень;
- з відповідними початковими умовами система рівнянь Лагранжа другого роду розв'язується в середовищі математичного пакету Maple;
- аналіз комбінації початкових імпульсів дозволяє оцінити точність фінального положення елементів конструкції, а також дозволяє обчислити відповідні значення «стоп-коду».

5. Розробка геометричних моделей процесу розкриття у невагомості стержневих конструкцій як багатоланкових маятників

5.1. Геометричні моделі процесу розкриття двохланкових маятників

В статті продовжені дослідження, розпочаті в роботах [21–25]. Звідси було обрано рисунки, пояснення одержаних результатів при цьому суттєво оновлено.

Розглянемо імпульсні реактивні двигуни, встановлені на прикінцевих точках ланок маятника. Імпульсні реактивні двигуни повинні закріплюватися так, щоб їх дія була спрямована по нормалі до відповідної ланки. Ідею їх використання пояснимо на прикладі стержневої конструкції у вигляді подвійного маятника (рис. 1).

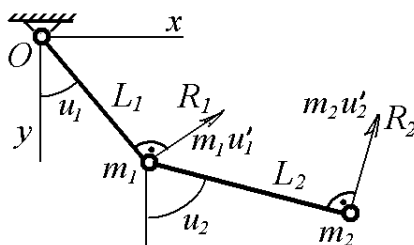


Рис. 1. Схема двохланкового маятника

Для цього оберемо уявну площину з декартовими координатами Ox , на якій в умовах невагомості буде коливатися маятник. Він складатиметься з двох невагомих нерозтяжних стержнів довжиною L_1 і L_2 , шарнірно сполучених між собою вузловою точкою. На кінцях стержнів закріплено вантажі з масами m_1 і m_2 . Нехай початок першої ланки маятника збігається з початком координат O . Узагальнени-

ми координатами вважатимемо кути $u_1(t)$ і $u_2(t)$, утворені на площині відповідними ланками з напрямком відліку (рис. 1). За умови відсутності дисипативних сил і з врахуванням «нульової» потенціальної енергії опис коливання маятника на уявній площині виконаємо на основі лагранжіана

$$L = 0.5 \left[m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) + m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \right], \quad (1)$$

де $x_1(t) = L_1 \sin(u_1(t))$; $y_1(t) = L_1 \cos(u_1(t))$;

$$x_2(t) = x_1(t) + L_2 \sin(u_2(t)); y_2(t) = y_1(t) + L_2 \cos(u_2(t)); \quad (2)$$

В цьому випадку система рівнянь Лагранжа другого роду має вигляд

$$m_1 L_1 u_1'' + m_2 L_2 u_2'' \cos(u_1 - u_2) + m_2 L_2 (u_1')^2 \sin(u_1 - u_2) + m_2 L_1 u_1'' = 0;$$

$$L_1 u_1'' \cos(u_1 - u_2) - L_1 (u_1')^2 \sin(u_1 - u_2) + L_2 u_2'' = 0. \quad (3)$$

Тут $u_1' = \frac{d}{dt} u_1(t)$; $u_2' = \frac{d}{dt} u_2(t)$; $u_1'' = \frac{d^2}{dt^2} u_1(t)$; $u_2'' = \frac{d^2}{dt^2} u_2(t)$ – похідні функції опису узагальнених координат.

При розв'язанні системи рівнянь (3) слід враховувати координати таких векторів: довжин ланок маятника: $L = \{L_1, L_2\}$; значень мас вантажів: $m = \{m_1, m_2\}$; значень початкових кутів відхилення: $U = \{u_1(0), u_2(0)\}$, а також значень швидкостей, наданих кутам відхилення: $U' = \{u_1'(0), u_2'(0)\}$.

З виконанням початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду (3) розв'язано наближено методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету *maple*, і одержані розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$. Це дозволяє на площині в системі координат Оху визначити координати прикінцевої вузлової точки (x_2, y_2) другої ланки маятника в момент часу t . Для обчислення цих координат у виразах (2) слід замінити малі літери u на великі U .

Наведемо приклад визначення нехаотичних траєкторій коливань другого вантажу маятника шляхом розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду. Враховуючи те, що двохланкова конструкція доставлятиметься у складеному вигляді, то спільною для всіх прикладів буде початкова умова $U = \{0, \pi\}$. Приклади реалізацій розкриття стержневих маятників в невагомості у вигляді анімацій можна знайти на ресурсі [25].

Приклад. $L = \{2, 1\}$; $m = \{1, 2\}$. На рис. 2 наведені результати обчислень залежно від координат вектора $U' = \{u_1'(0), u_2'(0)\}$.

Зображені на рис. 2 криві є прикладом циклічної нехаотичної траєкторії прикінцевої точки двохланкового маятника (циклічної траєкторії з особливими точками «загострення»), яку можна застосувати при виготовленні «зацепів» конструкцій в невагомості. Варіанти рисунків наведено в роботі [25, рис. 3–6].

5.2. Геометричні моделі процесу розкриття чотириланкових маятників

Розвиваючи результати робіт [21, 22], у якості другого прикладу, наведемо розрахунки розкриття чотириланкової маятникової конструкції (рис. 3). Вважа-

тимемо, що виконуються всі умови попередніх припущень. Узагальненими координатами вважатимемо кути $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$, утворені на площині відповідними ланками з напрямком відліку.

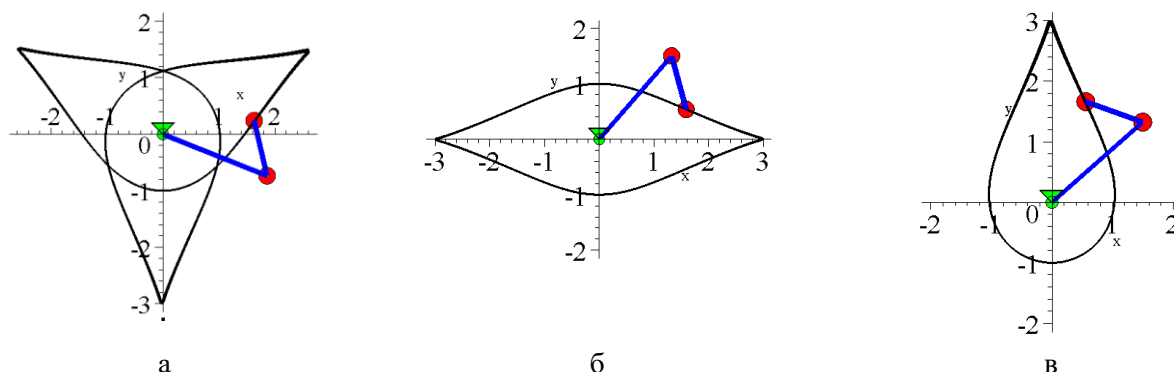


Рис. 2. Обчислення для прикладу залежно від координат вектора U' : а – $U'=\{1; 0,65\}$; б – $U'=\{1; 0,05\}$; в – $U'=\{1; 0,947\}$

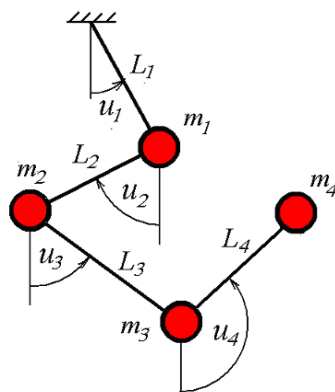


Рис. 3. Схема чотириланкового маятника

За допомогою узагальнених координат обчислюємо координати вузлових точок маятника:

$$x_1(t) = L_1 \sin(u_1(t)); \quad y_1(t) = L_1 \cos(u_1(t));$$

$$x_2(t) = x_1(t) + L_2 \sin(u_2(t)); \quad y_2(t) = y_1(t) + L_2 \cos(u_2(t)); \quad (4)$$

$$x_3(t) = x_2(t) + L_3 \sin(u_3(t)); \quad y_3(t) = y_2(t) + L_3 \cos(u_3(t));$$

$$x_4(t) = x_3(t) + L_4 \sin(u_4(t)); \quad y_4(t) = y_3(t) + L_4 \cos(u_4(t)).$$

За умови відсутності дисипативних сил і з врахуванням «нульової» потенціальної енергії опис коливання маятника на уявній площині виконаємо на основі лагранжіана:

$$L = 0,5[m_1(x_1'^2 + y_1'^2) + m_2(x_2'^2 + y_2'^2) + m_3(x_3'^2 + y_3'^2) + m_4(x_4'^2 + y_4'^2)]. \quad (5)$$

Опис руху чотириланкового маятника одержимо у вигляді системи з чотирьох диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду відносно функцій $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ і $u_4(t)$ (з причини громіздкості тут не наведено). При розв'язанні одер-

жаної системи слід враховувати координати таких векторів: довжин ланок маятника: $L=\{L_1, L_2, L_3, L_4\}$; значень «мас» вузлів: $m=\{m_1, m_2, m_3, m_4\}$; значень початкових кутів відхилень: $U=\{u_1(0), u_2(0), u_3(0), u_4(0)\}$, а також значень початкових швидкостей, наданих кутам відхилень $U'=\{u_1'(0), u_2'(0), u_3'(0), u_4'(0)\}$. Всі значення параметрів в умовних величинах.

З врахуванням відповідних початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду розв'язано наближено методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету *maple*, і одержані розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$, $U_3(t)$ і $U_4(t)$. В обраний на площині системі координат Oxy з використанням одержаних розв'язків визначаємо координати вузлових точок в момент часу t . Для цього використовуємо вирази (4) для обчислення координат вузлів маятника за допомогою узагальнених координат, замінивши там малі літери u на великі U . За допомогою складеної *maple* програми крім переміщення вузлових точок можна визначити швидкості, що дає можливість будувати відповідні фазові траєкторії переміщення. Багатоланкову каркасну конструкцію на орбіту доставляють у складеному вигляді (наочно це нагадує побутовий метр у складеному стані). Тобто початкове положення множини ланок маятника має «складений» вигляд, і вектор значень початкових кутів відхилень завжди матиме координати $U=\{\pi/2, -\pi/2, \pi/2, -\pi/2\}$.

Наведемо тестовий приклад геометричного моделювання розкриття чотириланкових каркасів. Після виконання програми одержимо послідовність кадрів анімаційних зображень залежно від часу розкриття конструкції [25].

Приклад. Довжини ланок: $L=\{4.3, 5, 3.5, 6\}$. Імпульси $U'=\{1, 0, 0, 0.5\}$ забезпечують двигуни, які розташовані на першому та четвертому вантажах.

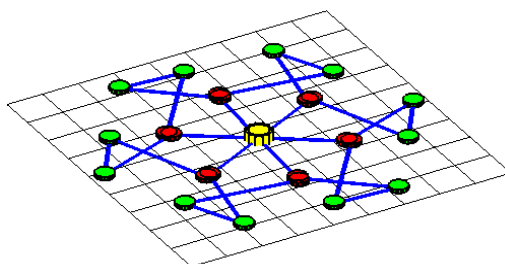


Рис. 4. Стержнева конструкція прикладу в момент часу $t=1,76$

На рис. 4 наведено стан стержневої конструкції після розкриття шести маятників в момент часу $t=1.76$. Її визначатимуть наступні значення координат вектора «стоп-коду» $U_{\text{STOP}} = \{3.074, -2.276, 1.5, -0.6652\}$. Їх аналіз показує, що на фінальній стадії розкриття швидкості вузлів матимуть значення: $u_1'(1,76) = 1$; $u_2'(1,76) = -0.8$; $u_3'(1,76) = 0$; $u_4'(1,76) = 0.45$. Інші варіанти рисунків наведено в роботі [25, рис. 8–14].

5.3. Геометричні моделі процесу розкриття магдебурзького маятника

Наведемо розрахунки розкриття нелінійної стержневої конструкції у вигляді магдебурзького маятника. Під терміном «магдебурзький маятник» розуміємо конструкцію [26], яка експонується в музеї «Вежа Століття» у німецькому місті Магдебург, і призначена для демонстрації хаотичних коливань. Конструкція складається з двох стержнів (рис. 5). Перший стержень однією з внутрішніх точок прикріплений до нерухомої точки O , а другий стержень своїм кінцем прикріплений до точки першої ланки.

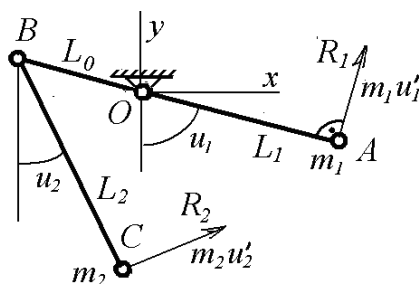


Рис. 5. Схема магнебузького маятника

Вважатимемо, що виконуються всі умови попередніх припущень. Узагальненими координатами вважатимемо кути $u_1(t)$ і $u_2(t)$, утворені на площині відповідними ланками з віссю Оу як напрямком відліку. За допомогою узагальнених координат визначимо декартові координати вузлових точок маятника:

$$\begin{aligned} x_A(t) &= L_1 \sin(u_1(t)); \quad y_A(t) = L_1 \cos(u_1(t)); \\ x_B(t) &= -L_0 \sin(u_1(t)); \quad y_B(t) = -L_0 \cos(u_1(t)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$x_C(t) = x_B(t) + L_2 \sin(u_2(t)); \quad y_C(t) = y_B(t) + L_2 \cos(u_2(t)).$$

За умови відсутності дисипативних сил і з врахуванням «нульової» потенціальної енергії опис коливання маятника виконаємо на основі лагранжіана

$$L = 0,5m_1L_1^2u_1'^2 - m_2L_0L_2u_1'v'\cos(u_1 - u_2) + 0,5m_2L_0^2u_1'^2 + 0,5m_2L_2^2u_2'^2 + 0,5Ju_2'^2. \quad (7)$$

В цьому випадку система рівнянь Лагранжа другого роду матиме вигляд

$$\begin{aligned} m_1L_1^2u_1'' - m_2L_0L_2u_2''\cos(u_1 - u_2) - m_2L_0L_2u_2'^2\sin(u_1 - u_2) + m_2L_0^2u_1'' &= 0; \\ -m_2L_0L_2u_1''\cos(u_1 - u_2) - m_2L_0L_2u_1'^2\sin(u_1 - u_2) + m_2L_2^2u_2'' + Ju_2'' &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

Тут $u_1' = \frac{d}{dt}u_1(t)$; $u_2' = \frac{d}{dt}u_2(t)$; $u_1'' = \frac{d^2}{dt^2}u_1(t)$; $u_2'' = \frac{d^2}{dt^2}u_2(t)$ – похідні функції опису узагальнених координат; $J=0,1$ – момент інерції другої ланки.

При розв'язанні системи рівнянь (8) слід враховувати координати таких векторів: довжин ланок маятника: $L=\{L_0, L_1, L_2\}$; значень мас вантажів: $m=\{m_1, m_2\}$; значень початкових кутів відхилень: $U=\{u_1(0), u_2(0)\}$, а також значень швидкостей, наданих кутам відхилень: $U'=\{u_1'(0), u_2'(0)\}$. З врахуванням початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду (8) розв'язано наближено методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету Maple, і одержані розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$. Для обчислення декартових координат точки С на другій ланці маятника у виразах (6) слід замінити малі літери u на великі U . В результаті виконання програми одержимо залежно від часу послідовність кадрів розкриття конструкції у вигляді комп'ютерних анімаційних зображень.

Наведемо приклад визначення результату розкриття стержневих конструкцій

типу магдебурзького маятника. Оскільки двохланкова конструкція доставлятиметься у складеному вигляді, то спільною для всіх прикладів буде початкова умова $U=\{0, 0\}$. Значення всіх параметрів в умовних величинах.

Приклад. $L=\{1, 1.5, 1.5\}$; $m=\{1, 1\}$. На рис. 6 наведені траєкторії точки залежно від координат вектора $U'=\{u_1'(0), u_2'(0)\}$.



Рис. 6. Обчислення для прикладу залежно від координат вектора U' : а – $U'=\{1; -0,7098\}$; б – $U'=\{1; -0,6569\}$

Зазначимо, що періодичні рухи другого вантажу двохланкового маятника можна використовувати при реалізації на орбіті певних операцій [23, 24]. Також було встановлено, що похибка у розмірі «процент величини» по різному впливає на результат розкриття різних подвійних маятників. Найголовнішим є те, що для маятників з параметрами $L=\{1, 0.5, 1.5\}$; $m=\{1, 1\}$; $U'=\{1, -0.788\}$; $U'=\{1, -0.5743\}$; $U'=\{1, -0.8815\}$ траєкторії руху прикінцевої точки збігаються і відрізняються лише напрямками її переміщення. Інші варіанти рисунків наведено в роботі [25, рис. 18–20].

5.4. Геометричні моделі процесу розкриття маятника Томсона-Тета

В четвертому прикладі розглянемо розкриття нелінійної стержневої конструкції у вигляді маятника Томсона-Тета [27], який можна використовувати для унаочнення деяких процесів ядерної фізики. Конструкція складається з двох стержнів. Перший стержень початком прикріплений до нерухомої точки O , а другий стержень своєю серединою прикріплений до прикінцевої точки першої ланки (рис. 7).

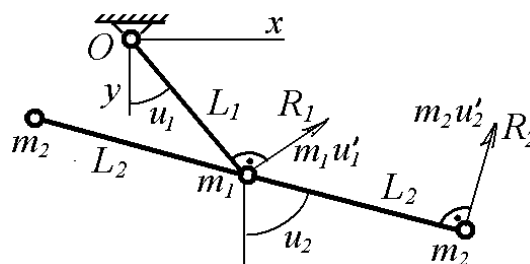


Рис. 7. Схема маятника Томсона-Тета

Вважатимемо, що виконуються всі умови попередніх припущень. Узагальненими координатами оберемо кути $u_1(t)$ і $u_2(t)$, утворені на площині відповідними ланками з віссю Oy як напрямком відліку. За допомогою узагальнених координат визначимо координати вузлових точок маятника:

$$x_1(t) = L_1 \sin(u_1(t)); y_1(t) = L_1 \cos(u_1(t));$$

$$x_2(t) = x_1(t) + L_2 \sin(u_2(t)) \quad y_2(t) = y_1(t) + L_2 \cos(u_2(t)); \quad (9)$$

$$x_3(t) = x_1(t) - L_2 \sin(u_2(t)) \quad y_3(t) = y_1(t) - L_2 \cos(u_2(t)).$$

За умови відсутності дисипативних сил і з врахуванням «нульової» потенціальної енергії опис коливання маятника виконаємо на основі лагранжіана

$$L = m_2(2L_1^2 u_1'^2 + L_2^2 u_2'^2). \quad (10)$$

В цьому випадку система рівнянь Лагранжа другого роду матиме вигляд

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial u_1'} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_1} = m_2 L_1^2 u_1'' = 0; \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial u_2'} \right) - \frac{\partial L}{\partial u_2} = m_2 L_2^2 u_2'' = 0.$$

Тут $u_1' = \frac{d}{dt} u_1(t)$; $u_2' = \frac{d}{dt} u_2(t)$; $u_1'' = \frac{d^2}{dt^2} u_1(t)$; $u_2'' = \frac{d^2}{dt^2} u_2(t)$ – похідні функції опису узагальнених координат. Звернемо увагу на те, що у рівняння (11) не входить m_1 . Пояснення цього феномену наведено в роботі [28].

При розв'язанні системи рівнянь (11) слід враховувати координати таких векторів: довжин ланок маятника: $L = \{L_1, L_2\}$; значень мас вантажів: $m = \{m_1, m_2\}$; значень початкових кутів відхилень: $U = \{u_1(0), u_2(0)\}$, а також значень швидкостей, наданих кутам відхилень: $U' = \{u_1'(0), u_2'(0)\}$. З врахуванням початкових умов систему рівнянь Лагранжа другого роду (11) розв'язано наближено методом Рунге-Кутти в середовищі математичного пакету maple, і одержані розв'язки позначено символами $U_1(t)$, $U_2(t)$. Для обчислення декартових координат прикінцевих точок на другій ланці маятника у виразах (9) слід замінити малі літери u на великі U .

Наведемо приклад визначення результату розкриття стержневих конструкцій типу Томсона-Тета шляхом розв'язання системи рівнянь Лагранжа другого роду. Оскільки двохланкова конструкція доставлятиметься у складеному вигляді, то спільною для всіх прикладів буде початкова умова $U = \{0, 0\}$. Значення всіх параметрів в умовних величинах.

Приклад. $L = \{1.52, 0.91\}$; $m = \{1, 1\}$ $U' = \{1, -0.5\}$. На рис. 8 наведено послідовні кадри процесу розкриття конструкції залежно від часу t . «Стоп-кодом» в момент часу $t = 1.05$ будуть числа $U_{\text{STOP}} \{1.05; -0.525\}$. Інші варіанти рисунків наведено в роботі [25, рис. 22–24].

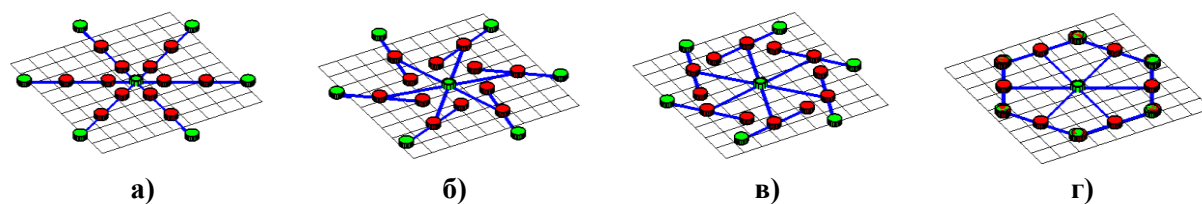


Рис. 8. Розкриття маятника Томсона-Тета залежно від часу: а – $t = 0$; $u_1 = 0$; $u_2 = 0$; б – $t = 0.315$; $u_1 = 0.315$; $u_2 = -0.158$; в – $t = 0.718$; $u_1 = 0.718$; $u_2 = -0.359$; г – $t = 1.05$; $u_1 = 1.05$; $u_2 = -0.525$

В результаті досліджень були перевірені наступні властивості маятника Томсона-Тета, які сприятимуть його використанню при конструюванні систем розкриття стержневих конструкцій у невагомості. В момент часу t величини кутів розкриття пропорційні відповідним початковим швидкостям зміни кутів $u_1'(0)$ і $u_2'(0)$. В процесі розкриття поточні швидкості зміни кутів постійні і співпадають з початковими швидкостям $u_1'(0)$ і $u_2'(0)$. Розкриття стержневої конструкції типу маятника Томсона-Тета не залежать від маси m_1 . Інші властивості маятника Томсона-Тета розглянуті в роботі [29].

6. Обговорення результатів інерційного способу розкриття багатоланкових маятників

Отримані результати пояснюються можливістю використовувати процес ініціювання коливань маятників як фізичну аналогію удару «умовним імпульсом» по кінцевому вузловому елементу багатоланкового маятника. Реалізувати такий підхід на практиці слід імпульсними реактивними двигунами, дія яких спрямована по нормалі до відповідних ланок маятника. Після дії імпульсами на вузлові елементи маятника величина кінетичної енергії приймається незмінною, а одержана коливальна система сприймається як консервативна (для малих проміжків часу).

Особливості запропонованого методу і отриманих результатів в порівнянні з існуючими полягають у новій трактовці «стоп-коду» – тобто набору узагальнених координат, що відповідають фіксованим ланкам маятника в наперед розрахованому положенні. Цим забезпечується необхідна кінцева геометрична форма стержневої конструкції. Важливим є також спосіб оцінки допустимих похибок величин імпульсів для досягнення розкриття певної форми (що рідко розглядається в аналогічних роботах). Розглянуто можливість визначення циклічних траєкторій переміщення вузлових точок з особливими точками, які мають вигляд «загострення».

Дослідження обмежується поняттям ідеалізації геометричних моделей: нехтування дисипативними силами, спрощене припущення про «нульову» потенціальну енергію, рівнозначність за величинами мас ланок. Також модель передбачає рух виключно у двовимірній площині, що не враховує реальні просторові впливи.

Серед недоліків вкажемо на обмеження, пов'язані з використанням концепції багатоланкових маятників, довжини і маси ланок яких переважно не однакові. В перспективі ці труднощі можуть бути усунуті за допомогою розв'язання оберненої задачі компоновки. Тобто по заданому кінцевому розташуванню елементів маятників слід визначити раціональний набір його параметрів та початкових умов, які забезпечать задане розкриття.

Розвиток даного напрямку досліджень полягає у детальному дослідженні інерційної системи розкриття за умови існування не однакових за величинами мас вузлових елементів конструкції. Режим анімації динаміки формування конструкцій сприятиме обґрунтуванню обчислення параметрів стержневих конструкцій. У тому числі і для специфіки виконання рятувальних робіт.

7. Висновки

1. Для одержання циклічних траєкторій двохланкових маятників визначено параметри їх прикінцевих точок, які мають особливі точки «загострення». Для тестових параметрів $L=\{2, 1\}$; $m=\{1, 2\}$ можливо обчислювати значення швидкостей, наданих кутам відхилень: $U'=\{u_1'(0), u_2'(0)\}$. На рис. 2 наведено приклади циклічних траєкторій залежно від варіантів $U'=\{1; 0,65\}$; $U'=\{1; 0,05\}$; $U'=\{1; 0,947\}$.

2. Для моделювання дії імпульсного реактивного двигуна розроблено схему ініціювання коливань шляхом впливу імпульсом на прикінцеві точки ланок конкретного маятника, що дозволило змодельовати динаміку розкриття багатоланкової стержневої конструкції, та спостерігати за нею в режимі комп'ютерної анімації. Розглянуто розкриття стержневих конструкцій типу Томсона-Тета з параметрами $L=\{1.52, 0.91\}$; $m=\{1, 1\}$ $U'=\{1, -0.5\}$. Послідовні кадри процесу розкриття конструкції, коли «стоп-кодом» в момент часу $t = 1.05$ будуть числа $U_{\text{STOP}}\{1.05; -0.525\}$. На рис. 8 зображено анімаційні кадри розкриття маятника Томсона-Тета залежно від часу.

3. На графічному рівні досліджено важливе питання похибки значення імпульсу для ініціювання коливань маятника, щоб одержати прийнятне розташування його ланок. Графічний підхід базується на використанні сумісних зображень та числовому порівнянні за допомогою комп'ютерної анімації трьох варіантів розкриття з близькими значеннями їх початкових умов.

4. Одержані розв'язки системи рівнянь Лагранжа другого роду у невагомості дозволили протестувати у якості елементів конструкції конкретні види багатоланкових маятників: подвійного, чотириланкового, магдебурзького та Томсона-Тета. Отримані результати підтверджують доцільність застосування інерційного способу розкриття для моделювання конструкцій із заданою геометрією. Зазначені різновиди маятників планується доповнити.

Література

1. Алпатов А. П., Горбулин В. П. Космические платформы для орбитальных промышленных комплексов: проблемы и перспективы. Вісник НАН України. 2013. № 12. С. 26–38.
2. Алпатов А. П., Белоножко П. А., Белоножко А. А., Витушкин А. А. Большие отражающие поверхности в космосе. Антенны спутниковой связи. Системні технології. 2007. № 3(50). С. 73–87.
3. Алпатов А. П., Белоножко П. А., Белоножко А. А., Витушкин А. А. Большие отражающие поверхности в космосе. Радотелескопы, солнечные концентраторы, плоские отражатели. Системні технології. 2007. № 3(50). С. 88–101.
4. Hoyt R. SpiderFab. Architecture for On-Orbit Manufacture of Large Aperture Space Systems. FISO Briefing, 2015. 33 p.
5. Алпатов А.П. Динаміка перспективних космічних апаратів. Вісник НАН України. 2013. № 7. С. 6–13
6. Udwadia F. E., Koganti P. B. Dynamics and control of a multi-body planar pendulum. Nonlinear Dynamics. 2015. Vol. 82. № 1–2. P. 1059–1059. doi: 10.1007/s11071-015-2362-0
7. Lope A. M., Machado J. A. Dynamics of the N-link pendulum: a fractional perspective. International Journal of Control. 2017. Vol. 90. № 6. P. 1192–1192.
8. Fritzkowski P., Kaminski H. Dynamic of a rope as a rigid multibody system. Journal of mechanics of materials and structures. 2008. Vol. 3. № 6. P. 1059–1075.
9. Szuminski W. Dynamics of multiple pendula without gravity. Chaotic Modeling and Simulation. 2014. P. 57–67. URL: https://www.researchgate.net/publication/285143816_Dynamics_of_multiple_pendula_without_gravity
10. Pisculli A., Felicetti L., Gasbarri P., Palmerini G B., Sabatini M. Deployment analysis and control strategies of flexible space manipulators, in: Proceedings of the In-

ternational Astronautical Congress. China. 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/288131553_Deployment_analysis_and_control_strategies_of_flexible_space_manipulators

11. Sakovsky M., Pellegrino S., Mallikarachchi H. M. Y. C. Folding and Deployment of Closed Cross-Section Dual-Matrix Composite Booms. 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference. 2016. doi: 10.2514/6.2016-0970

12. Ma X., An N., Cong Q. et al. Design, modeling, and manufacturing of high strain composites for space deployable structures. *Communications Engineering*. 2024. Vol. 78. doi: 10.1038/s44172-024-00223-2

13. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. Tuesday, 01 March 2016. URL: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>

14. Шамаханов В. К., Хорошилов С. В. Особливості створення та використання космічних стрілоподібних конструкцій, що трансформуються. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2025. № 34(1). С. 3–20. doi: 10.15421/452501

15. Jennings A.L., Black J., Allen C. Empirically Bounding of Space Booms with Tape Spring Hinges. *Shock and Vibration*. 2013. Vol. 20. P. 503–518. doi: 10.3233/SAV-130764

16. Liu T.-W., Bai J.-B., Fantuzzi N. Folding behavior of the thin-walled lenticular deployable composite boom: Analytical analysis and many-objective optimization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. Vol. 30. № 11. P. 2221–2239. doi: 10.1080/15376494.2022.2053766

17. Yang H., Guo H., Wang Y., Feng J., Tian D. Analytical solution of the peak bending moment of an M boom for membrane deployable structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2020. Vol. 206. P. 236–246. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.09.005

18. Martinez-Alfaro H. Obtaining the dynamic equations, their simulation, and animation for N pendulums using Maple. URL: https://www.researchgate.net/publication/228781742_Obtaining_the_dynamic_equations_their_simulation_and_animation_for_n_pendulums_using_Maple

19. Xu Yan, Guan Fu-ling, Zheng Yao, Zhao Mengliang. Kinematic Analysis of the Deployable Truss Structures for Space Applications. *J. Aerosp. Technol. Manag., Sao Jose dos Campos*. 2012. Vol. 4. № 4. P. 453–462. doi: 10.5028/jatm.2012.04044112

20. Hoyt R., Cushing J., Slostad J. SpiderFab: Process for On-Orbit Construction of Kilometer-Scale Apertures. NASA Goddard Space Flight Center 8800 Greenbelt Road Greenbelt, MD 20771, 2013. 53 p.

21. Kutsenko L., Shoman O., Semkiv, O., Zapolsky L., Adashevskay I., Danylenko V., Semenova-Kulish V., Borodin D., Legeta J. Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. 6/7(90). P. 42–50.

22. Куценко Л. М. Ілюстрації до геометричного моделювання інерційного розкриття багатоланкового маятника у невагомості. 2017. URL: <http://repositcs.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>

23. Kutsenko L., Semkiv O., Zapolskiy L., Shoman O., Kalinovskiy A., Pikasov M., Adashevskaya I., Shelihova I., Sydorenko O. Geometrical modeling of the
Computer Science and Information Technology. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-11 173

process of weaving a cloth in weightlessness using the inertial unfolding of dual pendulum. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 1/7(91). P. 37–46. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114269

24. Куценко Л. М. Ілюстрації до геометричного моделювання процесу розкриття стержневих конструкцій у невагомості. 2018. URL: <http://repositcs.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>

25. Kutsenko L., Semkiv O., Zapolskiy L., Shoman O., Ismailova N., Vasyliiev S., Adashevskaya I., Danylenko V., Pobidash A. Geometrical modeling of the shape of a multilink rod structure in weightlessness under the influence of pulses on the end points of its links. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 2/7(92). P. 44–58. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126693

26. Chaotic Pendulum. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations. URL: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/chaotic-pendulum>

27. Space_Structure_Systems_Laboratory. Self deployable truss, 2016. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sH7NHZwPzMM>

28. Qi X., Deng Z., Li B., Liu R., Guo H. Design of Large Deployable Networks Constructed by Myard Linkages. CEAS Space Journal. 2013. Vol. 5. P. 147–155. doi: 10.1007/s12567-013-0036-7

29. D. ter Haar. Elements of Hamiltonian mechanics Pergamon Press Second Edition University Reader in Theoretica 1 Physics. Oxford, 1971. 212 p.

A. Kalynovskyi, PhD, Associate Professor, Head of the Department

L. Kutsenko, DSc, Professor

O. Sukharkova, Lecturer of the Department

S. Nazarenko, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

O. Diachkov, PhD, Lecturer of the Department

Y. Hrynko, PhD, Lecturer of the Department

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MODELING THE DEPLOYMENT OF ROD STRUCTURES AS MULTILINK PENDULUMS UNDER MICROGRAVITY CONDITIONS

A new approach to modeling the transformation of rod structures in microgravity by investigating elements of their frameworks, represented as multi-link pendulums. A geometric model is presented for the deployment of such structures under the influence of pulsed thrusts from jet engines mounted at the endpoints of the links. The deployment mechanism is based on initiating inertial motion without continuous external control after a brief impulse application. The dynamics of the deployment process are described using Lagrange's equations of the second kind, with particular emphasis on adapting the formulation to microgravity conditions, where potential energy can be considered negligible. This enables accurate modeling of structure deployment driven solely by kinetic energy, without further external control. As a result of the impulse action, the pendulum deploys by inertia, justifying the use of the term «inertial deployment method» for the frame. Mathematical models and a computer animation method are developed to predict the time evolution of link positions and to determine the fixation moment («stop code») for achieving the desired structure geometry. The influence of impulse magnitude errors on deployment accuracy is studied, and acceptable tolerance limits are established to maintain a satisfactory configuration. Test examples are provided for the deployment of double-link and four-link pendulums, as well as special configurations such as the Magdeburg pendulum and the Thomson-Tait pendulum. The obtained results are well-suited for animation to visualize the dynamics of rod structure formation—for example, illustrating the deployment of support frameworks for solar mirrors or space antennas. The proposed methods allow for the simplification of deployment technologies for large space objects, eliminating the need for complex electromechanical drives and thus reducing the mass and cost of space missions.

Keywords: core construction, process of opening in space, multi-link pendulum, Lagrange equation

References

1. Alpatov, A. P., Horbulyn, V. P. (2013). Kosmycheskye platformy dlia orbytalnykh promyshlennykh kompleksov: problemy i perspektivy. *Visnyk NAN Ukrainy*, 12, 26–38.
2. Alpatov, A. P., Belonozhko, P. A., Belonozhko, A. A., Vytushkyn, A. A. (2007). Bolshye otrazhaiushchye poverkhnosty v kosmose. *Antenny sputnykoi svyazy. Systemni tekhnolohii*, 3(50), 73–87.
3. Alpatov, A. P., Belonozhko, P. A., Belonozhko, A. A., Vytushkyn, A. A. (2007). Bolshye otrazhaiushchye poverkhnosty v kosmose. *Radoteleskopy, solnechnye kontsentratory, ploskye otrazhately. Systemni tekhnolohii*, 3(50), 88–101.
4. Hoyt, R. (2015). SpiderFab. Architecture for On-Orbit Manufacture of Large Aperture Space Systems. *FISO Briefing*, 33.
5. Alpatov, A. P. (2013). Dynamika perspektyvnykh kosmichnykh aparativ. *Visnyk NAN Ukrainy*, 7, 6–13.
6. Udawadia, F. E., Koganti, P. B. (2015). Dynamics and control of a multi-body planar pendulum. *Nonlinear Dynamics*, 82, 1–2, 1059–1059. doi: 10.1007/s11071-015-2362-0
7. Lope, A. M., Machado, J. A. (2017). Dynamics of the N-link pendulum: a fractional perspective. *International Journal of Control*, 90, 6, 1192–1192.
8. Fritzkowski, P., Kaminski, H. (2008). Dynamic of a rope as a rigid multibody system. *Journal of mechanics of materials and structures*, 3, 6, 1059–1075.
9. Szuminski, W. (2014). Dynamics of multiple pendula without gravity. *Chaotic Modeling and Simulation*, 57–67. Available at: https://www.researchgate.net/publication/285143816_Dynamics_of_multiple_pendula_without_gravity
10. Pisculli, A., Felicetti, L., Gasbarri, P., Palmerini, G B., Sabatini, M. (2013). Deployment analysis and control strategies of flexible space manipulators, in: *Proceedings of the International Astronautical Congress. China*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/288131553_Deployment_analysis_and_control_strategies_of_flexible_space_manipulators
11. Sakovsky, M., Pellegrino, S., Mallikarachchi, H. M. Y. C. (2016). Folding and Deployment of Closed Cross-Section Dual-Matrix Composite Booms. *3rd AIAA Spacecraft Structures Conference*. doi:10.2514/6.2016-0970
12. Ma, X., An, N., Cong, Q. et al. (2024). Design, modeling, and manufacturing of high strain composites for space deployable structures. *Communications Engineering*, 78. doi:10.1038/s44172-024-00223-2
13. Deployable Perimeter Truss with Blade Reel Deployment Mechanism. (2016). NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California. Tuesday. Available at: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/24098>
14. Shamakhanov, V. K., Khoroshylov, S. V. (2025). Osoblyvosti stvorennia ta vykorystannia kosmichnykh strilopodibnykh konstruktsii, shcho transformuiutsia. *Journal of Rocket-Space Technology*, 34(1), 3–20. doi: 10.15421/4525015
15. Jennings, A. L., Black, J., Allen, C. (2013). Empirically Bounding of Space Booms with Tape Spring Hinges. *Shock and Vibration*, 20, 503–518. doi:10.3233/SAV-130764
16. Liu, T.-W., Bai, J.-B., Fantuzzi, N. (2022). Folding behavior of the thin-walled lenticular deployable composite boom: Analytical analysis and many-objective optimization. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 30, 11, 2221–2239. doi: 10.1080/15376494.2022.2053766

17. Yang, H., Guo, H., Wang, Y., Feng, J., Tian, D. (2020). Analytical solution of the peak bending moment of an M boom for membrane deployable structures. *International Journal of Solids and Structures*, 206, 236–246. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2020.09.005

18. Martinez-Alfaro, H. Obtaining the dynamic equations, their simulation, and animation for N pendulums using Maple. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228781742_Obtaining_the_dynamic_equations_their_simulation_and_animation_for_n_pendulums_using_Maple

19. Xu, Y., Guan, Fu-ling, Zheng, Y., Zhao, M. (2012). Kinematic Analysis of the Deployable Truss Structures for Space Applications. *J. Aeronaut. Technol. Manag.*, Sao Jose dos Campos, 4, 4, 453–462. doi: 10.5028/jatm.2012.04044112

20. Hoyt, R., Cushing, J., Slostad, J. (2013). SpiderFab: Process for On-Orbit Construction of Kilometer-Scale Apertures. NASA Goddard Space Flight Center 8800 Greenbelt Road Greenbelt, MD 20771, 53.

21. Kutsenko, L., Shoman, O., Semkiv, O., Zapolsky, L., Adashevskay, I., Danylenko, V., Semenova-Kulish, V., Borodin, D., Legeta, J. (2017). Geometrical modeling of the inertial unfolding of a multi-link pendulum in weightlessness. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(90), 42–50.

22. Kutsenko, L. M. (2017). Iliustratsii do heometrychnoho modeliuvannia inertsiiino rozkryttia bahatolankovoho maiatnyka u nevahomosti. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/4868>

23. Kutsenko, L., Semkiv, O., Zapolskiy, L., Shoman, O., Kalinovskiy, A., Pikasov, M., Adashevskaya, I., Shelihova, I., Sydorenko, O. (2018). Geometrical modeling of the process of weaving a cloth in weightlessness using the inertial unfolding of dual pendulum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/7 (91), 37–46. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114269

24. Kutsenko, L. (2018). Iliustratsii do heometrychnoho modeliuvannia protsesu rozkryttia sterzhnevnykh konstruktiv u nevahomosti. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/6335>

25. Kutsenko, L., Semkiv, O., Zapolskiy, L., Shoman, O., Ismailova, N., Vasyliiev, S., Adashevskaya, I., Danylenko, V., Pobidash, A. (2018) Geometrical modeling of the shape of a multilink rod structure in weightlessness under the influence of pulses on the end points of its links. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/7(92), 44–58. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126693

26. Chaotic Pendulum. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations. Available at: <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/chaotic-pendulum>

27. Space_Structure_Systems_Laboratory. Self deployable truss, 2016. YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=sH7NHZwPzMM>

28. Qi, X., Deng, Z, Li, B, Liu, R, Guo, H. (2013). Design of Large Deployable Networks Constructed by Myard Linkages. *CEAS Space Journal*, 5, 147–155. doi: 10.1007/s12567-013-0036-7

29. D. ter Haar. (1971). *Elements of Hamiltonian mechanics* Pergamon Press Second Edition University Reader in Theoretica 1 Physics. Oxford, 212.

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025

*Р. І. Майборода, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-3461-2959)
Ю. А. Отрош, д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0003-0698-2888)
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОЦІНЮВАННЯ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ ДО ПРОГРЕСУЮЧОГО ОБВАЛЕННЯ

Розроблена комп'ютерна модель, яка дозволяє оцінювати стійкість залізобетонної монолітної будівлі до прогресуючого обвалення під впливом комбінованої дії пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху. Для цього було створено просторову фізично та геометрично нелінійну модель шестиповерхової виробничої будівлі. Модель враховує сумісну роботу несучих конструкцій, зміну теплофізичних і механічних властивостей матеріалів під впливом підвищених температур, утворення локальних руйнувань, перерозподілу внутрішніх зусиль та динамічних ефектів від вибухового навантаження. Модель реалізована в програмному комплексі ЛІРА-САПР із використанням модуля «теплопровідність» для врахування температурного впливу режиму стандартної пожежі тривалістю 60 хвилин та налаштувань «динаміка в часі» для моделювання імпульсного навантаження від вибуху в 15 кПа. У результаті моделювання встановлено, що ізольована дія пожежі призводить до зростання прогинів плит перекриття у 2,6 рази, а внутрішній вибух – до збільшення прогину нижньої плити у 5,2 рази відносно нормального стану. Найбільшу небезпеку становить сценарій сумісного впливу пожежі та вибуху при якому прогин нижньої плити досягнув 55,8 мм, що перевищує початкове значення у 8,3 рази. Такі деформації при комбінованих діях, потенційно можуть викликати втрату несучої здатності конструкцій і розвиток прогресуючого обвалення будівлі. Отримані результати становлять основу для підвищення рівня конструктивної безпеки будівель та зменшення ризику втрат людських життів в умовах надзвичайних ситуацій. Запропонований підхід забезпечує можливість всебічного оцінювання стійкості залізобетонних монолітних будівель до прогресуючого обвалення за комбінованої дії термічних та вибухових навантажень, а також обґрунтування та реалізації ефективних заходів для підвищення їхньої надійності та живучості.

Ключові слова: прогресуюче обвалення, пожежа, вибух, ЛІРА-САПР, комп'ютерна модель, комбінація навантажень

1. Вступ

Забезпечення надійності та безпеки будівельних конструкцій при дії надзвичайних ситуацій набуває особливої актуальності в умовах сучасних викликів. Однією з найнебезпечніших форм таких впливів є прогресуюче обвалення – каскадне руйнування значної частини будівлі, ініційоване локальним пошкодженням її окремих елементів. Серед причин, що можуть викликати таке пошкодження, особливе місце займають пожежі у поєднанні з внутрішніми вибухами, що супроводжуються різкими термомеханічними ефектами та нерівномірною деградацією конструктивних елементів [1].

Зокрема, дефлаграційні вибухи газоповітряних сумішей, які виникають у закритих або частково обмежених просторах приміщень, можуть створювати короточасні імпульсні навантаження високої інтенсивності. Поєднання дії таких вибухів із температурним впливом пожежі має значний вплив на конструкції, спричиняючи руйнування матеріалів, втрату зв'язків у вузлах та зниження несучої здатності [2, 3].

Наразі більшість наукових досліджень [4, 5] та нормативних документів [6, 7] розглядають вплив пожежі та вибуху на конструкції ізольовано, або спрощують взаємодію між ними. Недостатньо дослідженими залишаються аспекти розвитку аварії – як зміна температури, втрата жорсткості та міцності з плином часу приз-

водить до зміни механізмів руйнування. Особливо важливо враховувати просторову взаємодію елементів конструктивної системи – перекриттів, колон, вузлів з'єднання, які в умовах складних впливів не працюють незалежно, а утворюють єдину нелінійно–деформовану систему.

Таким чином, проблема забезпечення стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

У своїх дослідженнях Shan S., Wang H., Li S., Wang B. [8] представлено прикладні розрахункові моделі для оцінки деформаційної здатності та опору прогресуючому обваленню залізобетонних каркасів, що можуть бути використані на етапі інженерного проєктування. Водночас у межах цієї роботи не враховано вплив високотемпературного навантаження та надлишкового тиску, що виникають у результаті пожежі або вибуху, на несучу здатність конструкцій.

У дослідженнях Білошицької Н., Білошицького М., Татарченко З. та Дячука Б. [9] реалізовано чисельний експеримент, спрямований на вивчення напружено–деформованого стану конструктивних елементів металевої етажерки. Розрахунки здійснювалися на основі розроблених математичних моделей із використанням технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) у середовищі програмного комплексу ЛПРА–САПР. Модель будівлі враховувала складні умови експлуатації, включаючи постійне та змінне навантаження, сейсмічні впливи, а також сценарії прогресуючого обвалення.

У статті [10] розроблено прикладну методику аналізу прогресуючого обвалення залізобетонних каркасних систем. Адекватність методики підтверджено шляхом дослідження сценарію руйнування типової багатоповерхової будівлі в м. Ер–Ріяд під впливом вибухових хвиль. Водночас вплив пожежі або комбінованої дії «вибух – пожежа» не враховувався.

У роботі [11] представлено аналітичну модель оцінки потенціалу прогресуючого обвалення сталевих рами, яка зазнає комбінованого впливу вибуху та наступної пожежі. Модель враховує геометричні пошкодження конструктивних елементів, ефект навантаження–переміщення, втрату жорсткості в з'єднаннях, а також локальні зсуви колон під дією надлишкового тиску. Аналіз показав, що за комбінованого впливу вибуху та пожежі час втрати несучої здатності окремих елементів значно скорочується порівняно з випадком впливу лише пожежі. Однак інші конструктивні елементи, які можуть бути залучені до перерозподілу зусиль після втрати окремих опорних елементів, у роботі не розглядалися.

У статті [12] досліджено реакцію багатоповерхової будівлі на локалізований вибух, що призводить до виключення однієї з колон, а також до дії вибухового тиску на плиту перекриття, яка приймає на себе перерозподілене навантаження. Автори вказують, що досягнення граничного стану несучої здатності залежить не лише від цілісності колон, а й від деформативності плит перекриття над зоною пошкодження. Саме максимальна динамічна відповідь перекриття визначає вимоги до конструктивних з'єднань, які повинні зберігати пластичність для запобігання прогресуючому обваленню. Вплив термічного навантаження від пожежі після вибуху в дослідженні не враховувався.

Луссіопі В. з колегами [13] провели тривимірне чисельне моделювання руйнування залізобетонної будівлі під дією вибухового навантаження. У моделі були враховані колони, балки та цегляні стіни, що дало змогу відтворити послідовність

руйнування. Порівняння результатів моделювання з реальними фотографіями зруйнованої конструкції підтвердило адекватність чисельного підходу до прогнозування механізму прогресуючого обвалення під дією вибуху. Проте вплив пожежі у роботі не аналізувався.

Аналіз наявних досліджень свідчить про значний науковий інтерес до проблеми моделювання прогресуючого обвалення будівельних конструкцій, зокрема залізобетонних та сталевих каркасів, під впливом локального руйнування, вибухових навантажень і втрати окремих несучих елементів. У більшості наукових робіт моделювання здійснюється з використанням чисельних методів, що демонструють високу ефективність у прогнозуванні механізмів пошкоджень та розвитку обвалення.

Водночас спільним недоліком більшості розглянутих досліджень є відсутність врахування комбінованого впливу вибуху та пожежі, що є характерним для реальних аварійних ситуацій. Зокрема, у низці робіт ігнорується вплив високотемпературного навантаження на властивості матеріалів, втрата жорсткості та стійкості елементів конструкції після вибуху. Лише окремі дослідження частково враховують руйнування з'єднань, локальні зсуви колон та порушення просторової стійкості, однак ці ефекти, як правило, розглядаються без врахування температурної дії.

У відповідь на виявлені невирішені наукові завдання в роботі [14] запропоновано удосконалену методику, яка дає змогу здійснювати розрахунки та оцінювати стійкість будівель до прогресуючого обвалення за умов високотемпературного впливу пожежі та динамічного навантаження від внутрішнього дефлаграційного вибуху. Водночас залишається невирішеним питання програмної реалізації такої методики з оцінювання стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель під одночасною дією пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху з урахуванням сумісної роботи конструктивних елементів, зміни властивостей матеріалів внаслідок дії високих температур, втрати жорсткості у вузлах та ефектів перерозподілу внутрішніх зусиль, визначення прогинів та переміщень конструкцій.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є програмна реалізація оцінювання стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення, спричиненого впливом пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні завдання:

1. Визначити особливості розрахунку стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок дії пожежі та внутрішнього вибуху.

2. Розробити комп'ютерну модель у програмному комплексі ЛПРА–САПР для моделювання прогресуючого обвалення з урахуванням силових, високотемпературних впливів і тиску вибуху.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом досліджень є прогресуюче обвалення залізобетонних будівель при силових і високотемпературних впливах пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху. Предметом досліджень є напружено-деформований стан будівельних конструкцій при впливі високотемпературних чинників пожежі й силових від дефлаграційного вибуху. Основна гіпотеза дослідження – додатковий вплив надли-

шкового тиску дефлаграційного вибуху на будівельні конструкції піддані температурній дії певного періоду часу за стандартним температурним режимом пожежі збільшую ймовірність виникнення прогресуючого обвалення будівель. Для перевірки стійкості будівлі до прогресуючого обвалення, моделювання процесів вибуху та пожежі, розроблено та використано комп'ютерну модель на основі скінченних елементів в ЛІРА-САПР.

5. Визначення особливостей розрахунку прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

Відповідно до удосконаленої методики розрахунку, повна аналітична методика розрахунку на вогнестійкість має враховувати роботу конструктивної системи за підвищених температур, можливий вплив тепла та сприятливі впливи активних і пасивних систем вогнезахисту, а також невизначеності, що пов'язані з цими трьома властивостями, та відповідальність конструктивної системи (наслідки руйнування), враховувати надлишковий тиск вибуху.

Розрахунок на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та вибуху допускається виконувати у квазістатичній постановці. За основу розрахунку на стійкість до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху взято положення будівельного розрахунку [15] з додатковим урахуванням комбінації випадкових розрахункових ситуації дефлагарційного вибуху (динамічне навантаження) та спричинена ним подальша пожежа чи навпаки.

Міцність і стійкість будівель в умовах пожежі та вибуху забезпечуються вогнестійкістю та вибухостійкістю її конструктивної системи за умови, що вогнестійкість і вибухостійкість окремих будівельних елементів та їх з'єднань не є нижчими за відповідні характеристики будівлі в цілому.

Для достовірної оцінки стійкості будівель до прогресуючого обвалення за дії пожежі та вибуху необхідне всебічне врахування даних щодо місця виникнення та масштабів поширення пожежі, параметрів вибуху, сценарію їх розвитку у часі, а також залежностей теплофізичних і механічних характеристик матеріалів конструкцій від температури нагрівання та дії імпульсних навантажень.

Особливу увагу слід приділяти вторинним ефектам пожежі та вибуху, таким як температурні деформації, теплові розширення матеріалів, перерозподіл внутрішніх зусиль, зміна схем несучої роботи, локальні руйнування та розвиток механізмів прогресуючого обвалення конструктивних елементів.

Вплив пожежі враховується шляхом використання знижених теплофізичних і механічних характеристик матеріалів (міцності, модуля деформації, густини, теплопровідності тощо) відповідно до їх залежності від температури, визначеної за стандартними або реальними пожежними сценаріями.

Також моделюються температурні деформації та теплові розширення елементів конструкції, що впливають на зміну розподілу зусиль у системі.

Вплив вибуху враховується через застосування імпульсних навантажень, що характеризуються надлишковим тиском, тривалістю імпульсу та швидкістю навантаження, згідно з нормативними документами та моделями вибухового навантаження.

Для оцінки стійкості після вибуху також враховується локальне руйнування елементів, зниження жорсткості та несучої здатності пошкоджених зон конструкцій, що може призводити до розвитку прогресуючого обвалення.

Для оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху слід розглядати найнебезпечніші об'єкти такі як найбільш навантажені несучі конструкції з найбільшими значеннями напружено-деформованого стану та інші несучі будівельні конструкції, обмежені протипожежними перешкодами в межах одного поверху.

Час впливу пожежі на конструкції, значення надлишкового тиску вибуху та поверховість, на якій він прикладається, визначаються на основі аналізу нормативних документів та проєктних сценаріїв розвитку аварійних ситуацій.

При цьому враховується:

- часова тривалість пожежі – встановлюється відповідно до типових сценаріїв розвитку пожеж згідно з вимогами стандартів або результатів моделювання;

- значення надлишкового тиску вибуху – визначається залежно від характеру і масштабу вибуху згідно з розрахунковими методиками з урахуванням типу вибухової речовини, її кількості та умов вибуху.

Усі вихідні параметри впливу повинні бути обґрунтовані:

- на основі об'єктивних даних і прогностичних сценаріїв розвитку подій;
- з урахуванням особливостей експлуатації об'єкта, його функціонального призначення та класу наслідків (відповідальності).

Для розрахунків будівель на стійкість до прогресуючого обвалення переважно використовують комп'ютерні програмні комплекси, що розроблені на основі методу скінченних елементів.

Для виконання такого різновиду розрахунків важливими є можливості програмного забезпечення щодо врахування фізичної та геометричної нелінійності, а також динамічного ефекту. Такі особливості дозволяють значно підвищити точність моделювання та адекватно відтворити поведінку конструкції в умовах аварійного навантаження.

Подібні можливості реалізовані в сучасних інженерних програмних комплексах, зокрема ЛІРА-САПР, COSMOS-M, LS-DYNA, SOFISTIK та інших, що спеціалізуються на нелінійному статичному й динамічному аналізі конструкцій.

Ключові аспекти, які враховуються під час проведення розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення, систематизовано в табл. 1.

Для проведення розрахунків використовувалася сертифікована в Україні ЛІРА-САПР, навчальна версія. Програмний комплекс в грудні 2015 року пройшов верифікації як програмний засіб для визначення параметрів напружено-деформованого стану, оцінки міцності і деформативності конструкцій та споруд, що підтверджується відповідним сертифікатом.

Наведена далі комп'ютерна модель розрахунку конструкцій на стійкість до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху стосується лише будівель із залізобетонних конструкцій.

6. Розробка комп'ютерної моделі прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

Розрахунок стійкості до прогресуючого обвалення залізобетонних будівель внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

1. Побудова геометричної моделі монолітної залізобетонної будівлі в програмному комплексі ЛІРА-САПР.

Табл. 1. Основні аспекти, які враховуються при розрахунку прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху

№ з/п	Аспект розрахунку	Особливості
1.	Температурні впливи пожежі	Зниження міцності, деформаційні властивості, теплові розширення
2.	Імпульсні навантаження вибуху	Надлишковий тиск, тривалість імпульсу, локальні руйнування
3.	Механізми прогресуючого обвалення	Температурні деформації, перерозподіл зусиль, зміна несучих схем
4.	Характеристики матеріалів при нагріванні	Міцність, модуль пружності, густина – залежність від температури
5.	Програмні комплекси для моделювання	ЛІРА-САПР, COSMOS-M, LS-DYNA, SOFISTIK
6.	Фізична та геометрична нелінійність	Необхідність врахування при раптовому руйнуванні
7.	Обґрунтування вихідних параметрів	На основі типових сценаріїв, характеристик вибуху й пожежі
8.	Вплив експлуатації та функції об'єкта	Залежить від класу наслідків та призначення будівлі

Для проведення дослідження стійкості залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху в ЛІРА-САПР було створено комп'ютерну просторову модель 6-ти поверхової виробничої будівлі, розрахункова модель якої представлена на рис. 1. Розміри в плані 33х12х33 м, конструктивна система будівлі – залізобетонний монолітний каркас, колони 500х500 мм, перекриття 220 мм, діафрагми жорсткості 300 мм, І ступінь вогнестійкості; категорії Б за вибухопожежною небезпекою.

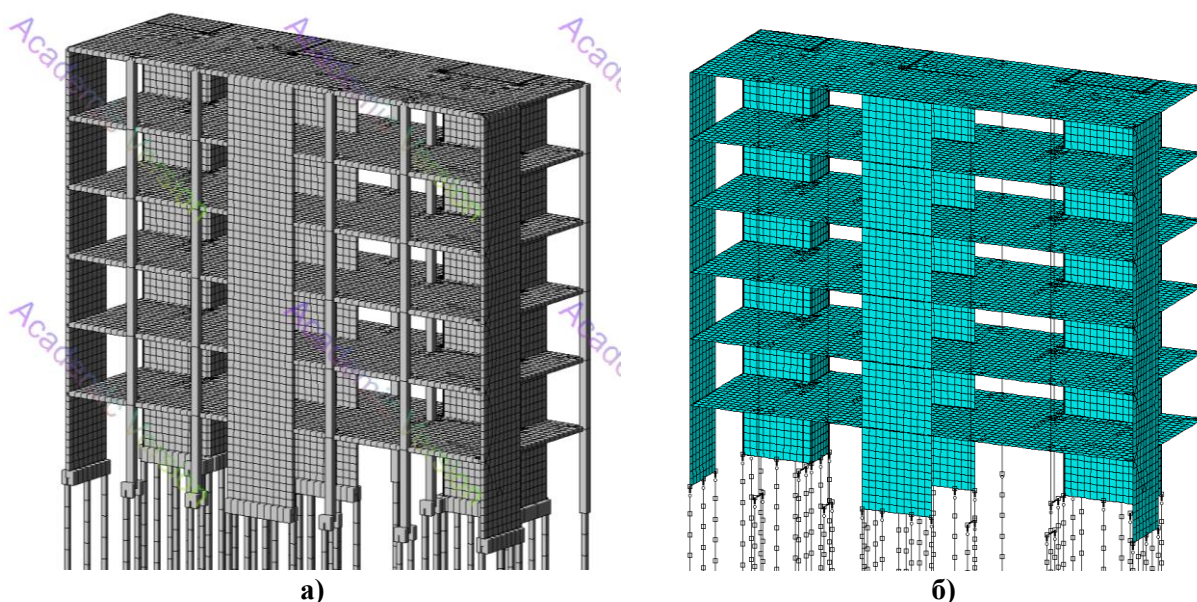


Рис. 1. Розрахункові моделі: а – просторова модель будівлі; б – скінченно-елементна модель будівлі

2. Початкові та граничні умови для розрахунку пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

Після створення просторової розрахункової моделі, для кожної будівельної конструкції призначалися відповідні типи жорсткості, матеріали та відповідні

перерізи, жорсткісні характеристики з урахуванням нелінійності роботи бетону та арматури. В даній моделі прийнято 8 типів жорсткості: 1 – стіни та діафрагми жорсткості – пластина 300 мм; 2 – колона – брус 500x500 мм; 3 – плита перекриття – пластина 220 мм; 4 – паля – брус 300x300 мм.

Наступним етапом було задано відповідні нормативні навантаження на будівлю: 1 – власна вага (постійне); 2 – постійні завантаження на перекриття та покриття – 0,385 т/м²; 3 – тривалі завантаження – 0,24 т/м²; 4 – короточасні завантаження – 0,24 т/м²; 5 – вітер під кутом 0 градусів; 6 – вітер під кутом 90 градусів. Сформована таблиця розрахункових сполучень зусиль та розрахункові сполучення навантажень, для різних сценаріїв навантажень. Призначено для конструкції відповідні типи скінченних елементів: для паль в ґрунті – 57 тип, одновузловий СКЕ; для колон і паль – тип 210 – універсальний СКЕ стрижень, який враховує фізичну нелінійність; для стін і перекриття тип 242 – трикутний СКЕ (оболонка), який враховує фізичну нелінійність; додатковий тип 244 – чотирикутний СКЕ (оболонка), який враховує фізичну нелінійність. Так як розрахунок будівлі проводився в постановці як система «земля–фундамент–будівля», призначався додатковий скінченний елемент для паль в ґрунті. Призначені відповідні нелінійні закони деформування матеріалів бетону та армуючого матеріалу.

ЛІРА–САПР всім елементам схеми попередньо автоматично створює армування по пружній схемі роботи залізобетонну, армування, проте слід обов'язково відкоригувати з урахуванням запасу міцності. Після задання необхідних параметрів, проведено розрахунок моделі для перевірки деформованого стану моделі на адекватність роботи та перевірку на допустиме переміщення по осях. При перевищенні значень відносних переміщень, необхідно відкоригувати схеми і зробити відповідний перерахунок та аналіз.

Перевірено будівельні конструкції з урахуванням меж вогнестійкості. Для цього у налаштуванні характеристик матеріалу виставлено критерій «враховувати вогнестійкість» та задано для кожної конструкції: температурний режим; необхідний клас вогнестійкості; характеристики матеріалу.

Прийнято сценарій умовної пожежі, що розвивається за стандартним температурним режимом, теплового впливу пожежі зазнають всі будівельні конструкції, які обмежені протипожежними перешкодами. Задання пожежі здійснювалося через задання знижених характеристик міцності та деформативності матеріалів залежно від розподілу температури нагрівання для виділених червоним конструкцій, які зображені на рис. 2.

Для відповідного інтервалу тривалості пожежі, у зв'язку із нерівномірним розподілом температури, кожному шару матеріалу на підставі значень усередненої температури, задавалися відповідні знижені характеристики матеріалів для цих температур згідно EN 1992–1–2.

Розрахунок на тепловий вплив пожежі виконують відповідно до визначеного сценарію з припущенням роботи матеріалів за нелінійними законами деформування на відповідний час теплового впливу пожежі становила 60 хв – як для перекриття. Для визначення розподілу температурних полів використовувався окремий модуль ЛІРА–САПР «теплопровідність» (рис. 3). Результати розрахунку температурних полів співпадають з проведеними натурними випробуваннями конструкцій.

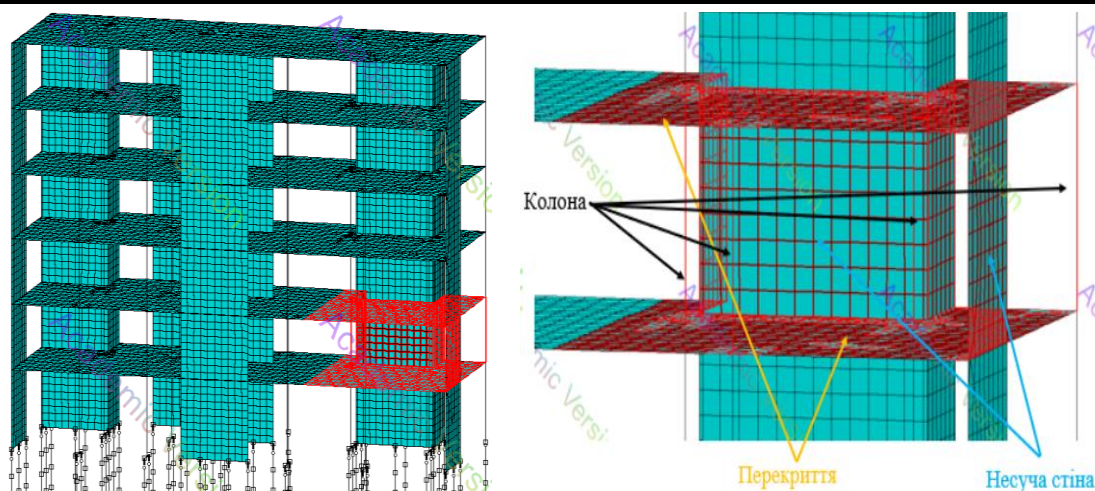


Рис. 2. Область пожежі в скінченно-елементній моделі будівлі

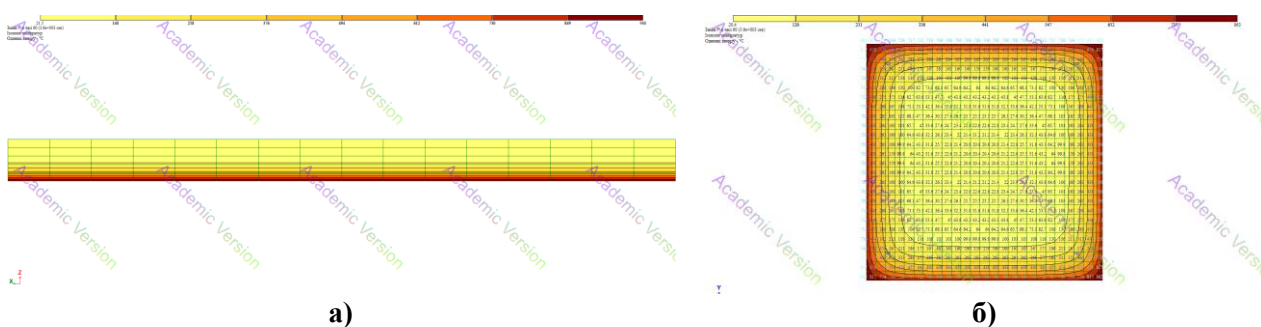


Рис. 3. Розподіл температурних полів у залізобетонних конструкціях: а – перекриття; б – колона

В даному розрахунку прийняті наступні параметри: стандартно-температурний режим; обігрів центральних колон з усіх сторін, кутових колон з двох сторін, центральних колон з трьох сторін; обігрів перекриття 1-го поверху зверху, перекриття 2-го поверху знизу; обігрів несучих стін з боку пожежі. При вивченні питання навантаження від пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху було встановлено, якщо що із заданням навантаження від пожежі питань не виникає, то із внутрішнім вибуху питання дещо складніше. По перше, велика кількість робіт та положення документів присвячено дослідженню питання вивченню зовнішніх вибухів для бризантних речовин, таких як тротил, тринітротолуол.

На рис. 4 представлено графічні залежності зміни тиску вибухової хвилі від часу. Графік (а) ілюструє характерну зміну тиску під час зовнішнього вибуху бризантних речовин відповідно до AISC Steel Design Guide 26. Графіки (б) демонструють часову залежність тиску при дефлаграційних внутрішніх вибухах, отриманих на основі результатів натурних випробувань [16].

Вибухи бризантних речовин характеризуються різким імпульсним підвищенням тиску до пікового значення з наступною швидкою декомпресією. Такі процеси супроводжуються наявністю двох фах: позитивної фази надлишкового тиску та негативної фази розрідження, що є типовим для детонаційного характеру вибуху.

На відміну від вибухових матеріалів інші газоподібні вибухові матеріали демонструватимуть зміну свого вихідного тиску вибуху. Вибух цих матеріалів часто неповний, і лише частина загальної маси вибухової речовини бере участь у процесі детонації, про що свідчить відносно пологий графік підвищення тиску на відмінно від вибухів бризантних речовин.

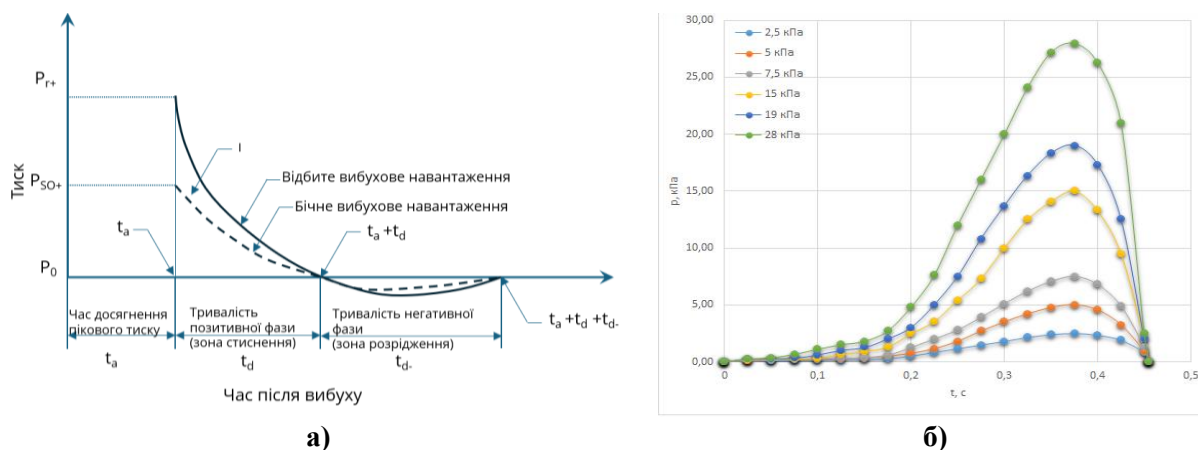


Рис. 4. Залежності зміни тиску вибухової хвилі в часі: а – для зовнішніх вибухів бризантних речовин за AISC Steel Design Guide 26, б – для внутрішніх вибухів парогазоповітряних сумішей за ДСТУ 9176:2022

Умовно прийнято, що вибух виникає на 60-й хвилині після початку пожежі. Причини виникнення пожежі та вибуху на цьому етапі дослідження окремо не аналізувалися, оскільки основною метою є оцінка впливу комбінованого навантаження на несучу здатність конструкцій.

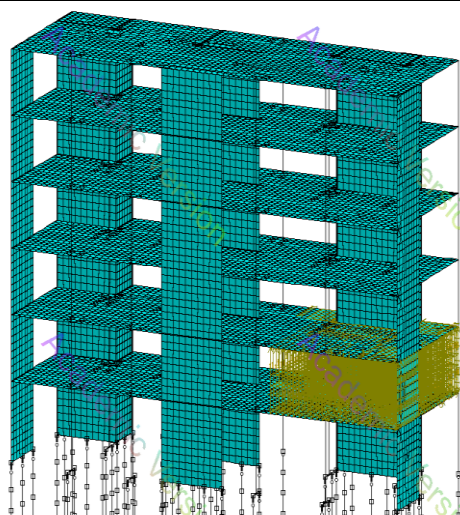
Для спрощеного розрахунку динамічного навантаження, викликаного вибухом, було використано припущення згідно з положеннями додатка D [17], динамічне навантаження від вибуху розподіляється рівномірно на всі конструктивні елементи будівлі. Це припущення дозволяє уникнути необхідності складного моделювання розповсюдження ударної хвилі в об'ємі приміщення та спростити розрахунок.

Надлишковий тиск від вибуху та його пікові значення визначалися відповідно до вимог [18], який встановлює методику розрахунку вибуху. При цьому залежності величини тиску від типу вибухонебезпечного газу або пари, їх відсоткового вмісту в повітрі, кількості й розмірів отворів, наявності або відсутності легкоскридних конструкцій в даному розрахунку не враховувалися. Вказані фактори є важливими для точного прогнозування параметрів вибуху, однак їх облік виходить за межі задачі на даному етапі дослідження.

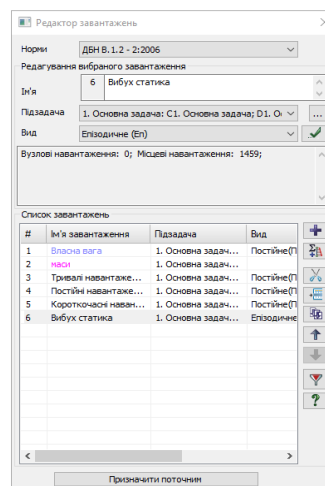
За результатами розрахунків прийнято максимальне значення надлишкового тиску вибуху на рівні 15 кПа, що відповідає типовим параметрам можливих внутрішніх вибухів побутових газоповітряних сумішей у закритих приміщеннях середніх розмірів.

На рис. 5 наведено механізм задання та перетворення в розрахунковій моделі статичного навантаження, отриманого для розрахункового надлишкового тиску вибуху, до еквівалентного динамічного навантаження з урахуванням значень часової залежності наведених попередньо на рис. 4б.

У результаті комп'ютерного моделювання було отримано розподіл напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій у межах трьох розрахункових сценаріїв. Перший сценарій відображає стан конструкцій за відсутністю аварійних ситуацій, що дозволяє визначити початковий розподіл зусиль (рис. 6). Другий – моделює умови безпосередньо під час стандартної пожежі протягом тривалістю 60 хв, з урахуванням зміни фізико-механічних властивостей матеріалів в залежності від температурного впливу (рис. 7).

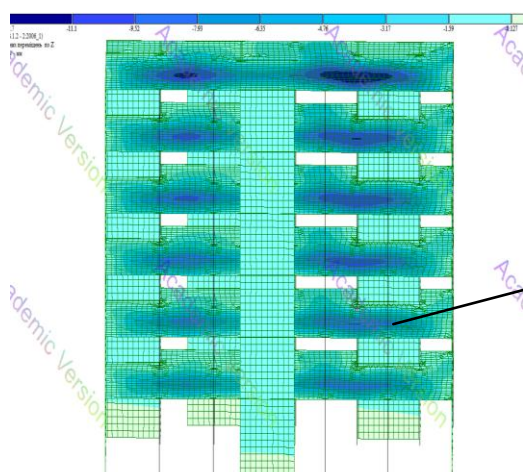


а)

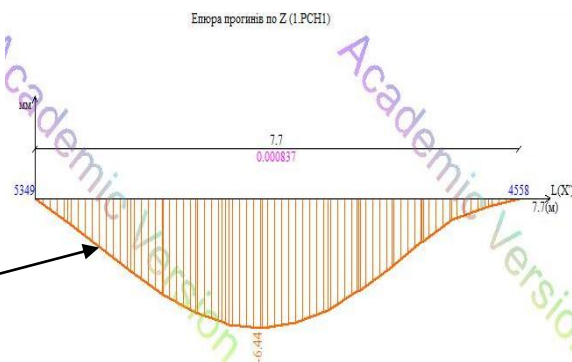


б)

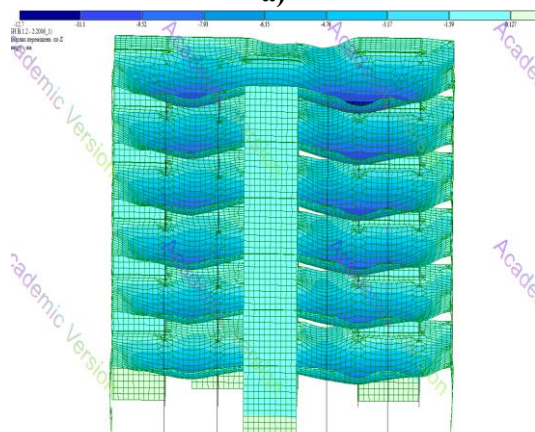
Рис. 5. Задання та перетворення в розрахунковій моделі вибухового навантаження: а – жовтим кольором виділена область вибухового навантаження в скінченно-елементній моделі будівлі, б – редактор завантажень, редагування завантажень



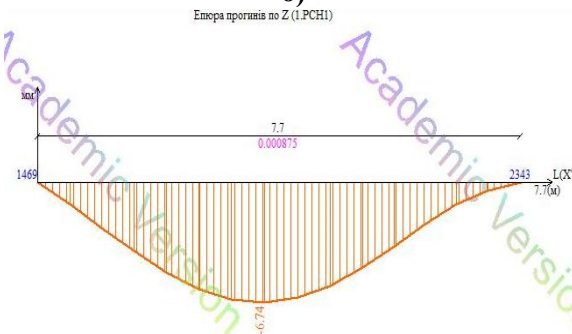
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення до аварійних ситуацій: а – ізополя відносних переміщень по Z; б – епюра прогинів верхньої плити перекриття (6,44 мм); в – ізополя переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епюра прогинів нижньої плити перекриття (6,74 мм)

Третій сценарій охоплює комбіновану дію стандартної пожежі протягом тривалістю 60 хв та внутрішнього вибухового навантаження з надлишковим

тиском 15 кПа, що дозволяє оцінити граничну стійкість конструкцій та можливість розвитку прогресуючого обвалення в умовах найскладнішого впливу (рис. 8).

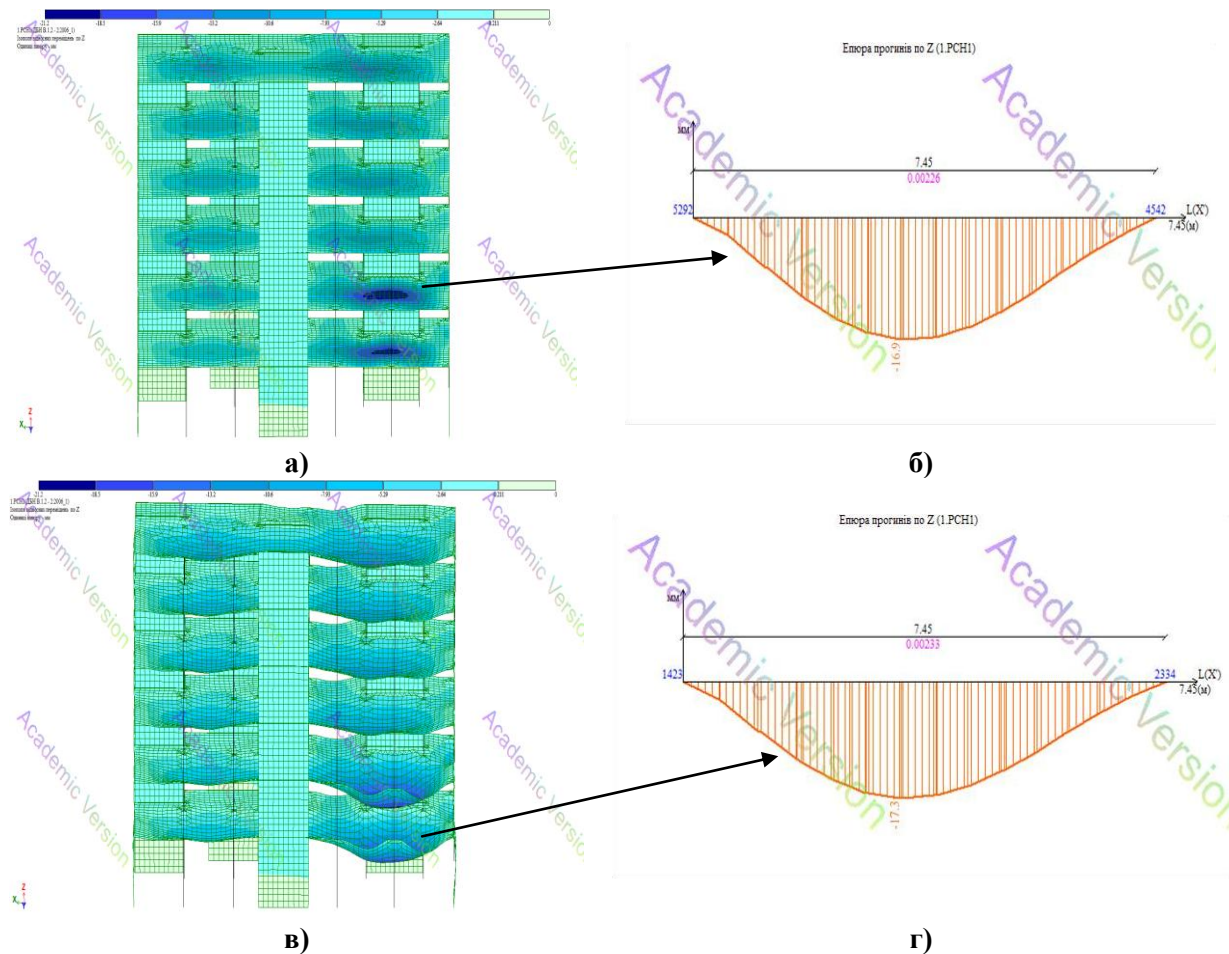


Рис. 7. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення при пожежі тривалістю 60 хв.: а – ізополі відносних переміщень по Z; б – епюра прогинів верхньої плити перекриття (16,9 мм); в – ізополі переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епюра прогинів нижньої плити перекриття (17,3 мм)

Узагальнені кількісні результати зміни переміщень (прогинів) верхньої та нижньої плит перекриття монолітної залізобетонної будівлі, отримані за результатами чисельного моделювання трьох сценаріїв аварійного навантаження – за нормальних умов експлуатації, під час дії пожежі, а також при комбінованому впливі пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху – систематизовані в табл. 2.

Табл. 2. Значення переміщень конструкцій при різних аварійних ситуаціях

Плита	Переміщення (прогин) конструкції, мм			
	Нормальні умови експлуатації	Пожежа 60 хв	Вибух 15 кПа	Пожежа 60 хв та вибух 15 кПа
Верхня	6,44	16,9 (збільшення у 2,6 рази)	-5,35	-14,4
Нижня	6,74	17,3 (збільшення у 2,6 рази)	33,4 (збільшення у 5,2 рази)	55,8 (збільшення у 8,3 рази)

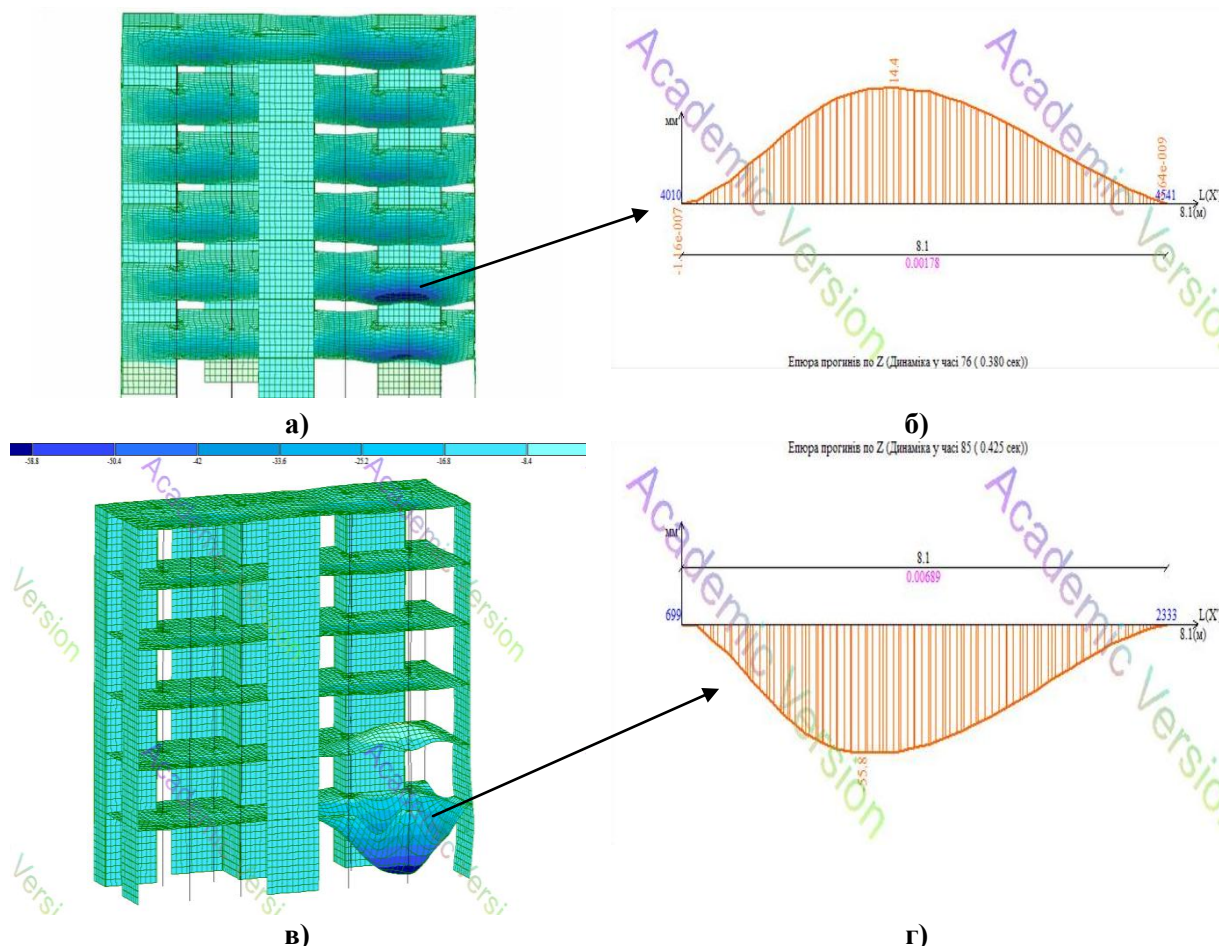


Рис. 8. Напружено-деформований стан конструкцій та переміщення при пожежі тривалістю 60 хв та внутрішньому дефлаграційному вибуху 15 кПа: а – ізополя відносних переміщень по Z; б – епюра прогинів верхньої плити перекриття (14,4 мм); в – ізополя переміщень по Z збільшені у 20 разів; г – епюра прогинів нижньої плити перекриття (55,8 мм)

Додаткове вибухове навантаження на конструкції при дії пожежі призводять до значних деформацій та переміщень, що збільшує передумови можливості прогресуючого обвалення будівлі при комбінованій дії пожежі та внутрішнього дефлаграційного вибуху.

7. Обговорення результатів програмної реалізації оцінювання стійкості будівель до прогресуючого обвалення

Результати комп'ютерного моделювання підтверджують суттєвий вплив як теплового, так і динамічного (вибухового) навантаження на напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій будівлі. Одночасне прикладання цих навантажень призводить до значного зростання деформацій перекриття в порівняно зі звичайним експлуатаційним станом. Ключовими механізмами такого ефекту є зменшення міцнісних характеристик конструкцій при нагріванні, додаткове динамічне навантаження і перерозподіл внутрішніх зусиль у системі будівлі внаслідок вибуху, зміна схеми роботи конструктивних елементів (рис. 1–5).

Визначені в ході комп'ютерного моделювання напружено-деформовані стани конструкцій до настання аварійної ситуації свідчать про прийнятність граничних значень переміщень у нормальних умовах. Зокрема, максимальні вертикальні прогини нижньої та верхньої монолітної залізобетонної плити перекриття в зонах найбільшого деформування становили в середньому 6,5 мм, що відповідає вста-

новленим нормативним значенням експлуатаційної придатності (рис. 6).

Під впливом температурного навантаження за стандартним температурним режимом пожежі тривалістю 60 хв, відбувається суттєве збільшення деформацій конструктивних елементів. Зокрема, результати моделювання свідчать про збільшення вертикальних прогинів як нижньої, так і верхньої плит перекриття в 2,6 рази порівняно з початковим (експлуатаційним) станом. Максимальні значення прогинів сягнули 16,9 мм, що наведено у відповідному розрахунковому сценарії (рис. 7). Такий характер змін свідчить про втрату жорсткості залізобетонних елементів унаслідок зміни властивостей матеріалу при дії високих температур. Зокрема, при підвищенні температури до 500–600 °C відбувається зменшення міцності бетону, втрата зчеплення між бетоном і арматурою, а також зниження пружних характеристик сталі та бетону. Всі ці фактори призводять до значного збільшення деформацій конструктивних елементів навіть без зміни прикладеного навантаження.

У разі комбінованого впливу стандартного температурного режиму пожежі тривалістю 60 хв та внутрішнього дефлаграційного вибуху з надлишковим тиском 15 кПа спостерігається істотне збільшення напружено-деформованого стану конструкцій. Зокрема, відзначено різке зростання величин переміщень і прогинів нижньої плити перекриття – до значень, що перевищують початкові в 8,2 рази порівняно з нормальними умовами експлуатації. Верхня плита перекриття під впливом вибухового навантаження зазнала зворотного переміщення: від максимального прогину вниз (16,9 мм) до підйому вгору на 14,4 мм, що свідчить про складний просторовий характер взаємодії конструктивних елементів при вибуху (рис. 8).

Аналіз значень, наведених у табл. 2, демонструє, що поєднана дія температурного та вибухового навантажень має суттєвий вплив на несучу здатність конструкцій, що слід враховувати при проєктуванні та оцінці їхньої несучої здатності в умовах потенційних аварій.

Особливістю розробленої за методикою комп'ютерної моделі є інтеграція в модель впливів пожежі та внутрішнього вибуху з урахуванням часової послідовності їх дії, геометричної та фізичної нелінійності конструкцій, просторової взаємодії елементів, а також температурної деградації матеріалів. На відміну від більшості попередніх досліджень, де аналіз проводиться або ізольовано для вибуху, або для пожежі, у цьому дослідженні враховано їх комбінацію – що є характерною ситуацією для реальних аварійних сценаріїв.

До обмежень комп'ютерної моделі слід віднести спрощення щодо геометрії реального середовища вибуху: не враховано форму приміщення, наявність та розташування легкоскидних конструкцій, характер розповсюдження хвилі. Вибух задавався як рівномірно розподілене навантаження, без просторової диференціації тиску, що відтворює більш жорсткі умови для проведення розрахунків.

Отримані дані підтверджують гіпотезу, що саме комбінація аварійних навантажень чинить найбільш небезпечний вплив на будівлі, а не ізольована дія одного з чинників. На відміну від класичних підходів, що базуються на ідеалізації місцевого руйнування окремого конструктивного елементу, розроблена комп'ютерна модель у середовищі ЛПРА–САПР дозволяє врахувати динаміку розвитку деформацій в часі та просторову взаємодію елементів конструктивної системи при комбінації аварійних ситуацій (пожежа, вибух).

До недоліків слід віднести спрощений підхід до завдання параметрів вибухового навантаження – фактична хімічна природа суміші, її концентрація, розташування джерела вибуху в моделі не враховувались. Також доцільним є врахування змін жорсткості з'єднань між конструктивними елементами в динаміці, включення контактної взаємодії та можливості утворення тріщин.

Подальший розвиток дослідження може охоплювати поєднання моделювання з натурними експериментами, включення в модель додаткових сценаріїв (наприклад, зовнішній вибух, вторинна пожежа, руйнування кількох поверхів). Основними труднощами стануть даного дослідження є проведення експериментальних випробувань яке полягає у складності відтворення реальних комбінацій навантажень у лабораторних умовах.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що застосування комплексної комп'ютерної моделі з можливістю урахування часової залежності температурного впливу, динамічного імпульсного навантаження, зміни фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричної нелінійності дозволяє більш точно оцінити граничні стани конструкцій, запропоновувати обґрунтовані заходи для стійкості будівель до прогресуючого обвалення.

8. Висновки

1. Визначені особливості розрахунку для визначення стійкості монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок дії пожежі та внутрішнього вибуху. Для достовірного розрахунку необхідне комплексне врахування температурних та динамічних впливів, просторової взаємодії конструктивних елементів, зниження фізико-механічних характеристик матеріалів залежно від температури, а також ефектів перерозподілу внутрішніх зусиль. Обґрунтовано доцільність використання квазістатичної та динамічної постановки задачі з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності системи. Підкреслено необхідність використання нормативних сценаріїв розвитку аварій з урахуванням характеру навантаження, часу впливу та конструктивних особливостей будівлі. Запропонований підхід об'єднує температурне та вибухове навантаження в єдину модель, забезпечує точність прогнозування граничного стану конструкцій та визначення найбільш небезпечних зон в будівлі при комбінації аварійних ситуацій.

2. Розроблена комп'ютерна модель у програмному комплексі ЛІРА-САПР для моделювання прогресуючого обвалення з урахуванням силових, високотемпературних впливів і тиску вибуху. Побудована просторова фізично та геометрично нелінійна комп'ютерна модель шестиповерхової монолітної залізобетонної будівлі в програмному середовищі ЛІРА-САПР. Модель охоплює повний цикл аварійного навантаження, включаючи режим стандартної пожежі тривалістю 60 хвилин, розрахунок температурних полів за допомогою модуля «теплопровідність», а також моделювання імпульсного вибухового навантаження з надлишковим тиском 15 кПа через налаштування «динаміка в часі». Здійснено призначення типів скінченних елементів, нелінійних характеристик матеріалів, сценаріїв пожежі та вибуху, а також їх часову послідовність. Результати моделювання дозволили зафіксувати значення деформаційних параметрів конструкцій за умов комбінованої дії аварійних впливів, що дозволяє прогнозування можливість руйнування конструкцій. Розроблена модель дозволяє здійснювати аналіз загальної стійкості конструктивної системи монолітних залізобетонних будівель до прогресуючого обвалення внаслідок пожежі та вибуху.

Література

1. Отрош Ю. А., Майборода Р. І., Ромін А. В. Дослідження методик розрахунку прогресуючого обвалення. *Механіка та математичні методи*. 2023. Вип. 2. С. 25–40. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40
2. Skob Y., Dreval Y., Vasilchenko A., Maiboroda R. Selection of material and thickness of the protective wall in the conditions of a hydrogen explosion of various power. *Key Engineering Materials*. 2023. Vol. 952. P. 121–129. doi: 10.4028/p-ST1VeT
3. Maiboroda R., Zhuravskij M., Otrosh Y., Karpuntsov V. Determination of the required area of easily removable structures to protect against progressive collapse. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1004. P. 73–83. doi: 10.4028/p-V0xA6H
4. Tanapornraweekit G., Haritos N., Mendis P. Behavior of FRP–RC plates under multiple independent air blasts. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2011. Vol. 25. № 5. P. 433–440. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191
5. Liu Y., Yan J., Huang F. Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defence Technology*. 2018. Vol. 14. № 5. P. 550–559. doi: 10.1016/j.dt.2018.07.026
6. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи. Чинний від 01.07.2013 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво», 2010. 81 с.
7. ДСТУ–Н Б EN 1990:2008. Єврокод. Основи проектування конструкцій. Чинний від 01.07.2009 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет з стандартизації «Арматура для залізобетонних конструкцій», 2009. 105 с.
8. Shan S., Wang H., Li S., Wang B. Evaluation of progressive collapse resistances of RC frame with contributions of beam, slab and infill wall. *Structures*. 2023. Vol. 53. P. 1463–1475. doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.114
9. Білошицька Н., Білошицький М., Татарченко З., Дячук Б. Математичне моделювання роботи будівельних конструкцій в складних умовах хімічного виробництва. *Містобудування та територіальне планування*. 2022. Вип. 81. С. 59–69. doi: 10.32347/2076-815x.2022.81.59-69
10. Almusallam T., Elsanadedy H., Abbas H., Alsayed S., Al-Salloum Y. Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. *Structural Engineering and Mechanics*. 2010. Vol. 36. № 3. P. 301–319. doi: <https://doi.org/10.12989/SEM.2010.36.3.301>
11. Ding Y., Chen Y., Shi Y. Progressive collapse analysis of a steel frame subjected to confined explosion and post-explosion fire. *Advances in Structural Engineering*. 2016. Vol. 19, № 11. P. 1780–1796. doi:10.1177/1369433216649381
12. Jahromi H., Izzuddin B., Nethercot D. Robustness assessment of building structures under explosion. *Buildings*. 2012. Vol. 2. № 4. P. 497–518. doi: 10.3390/buildings2040497
13. Luccioni B., Ambrosini R., Danesi R. Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*. 2004. Vol. 26. № 1. P. 63–71. doi: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011
14. Майборода Р. І., Отрош Ю. А. Дослідження методики розрахунку стійкості до прогресуючого обвалення будівель внаслідок пожежі та вибуху. *Комунальне господарство міст: наук.–техн. зб. Серія: Технічні науки та архітектура*. 2023. Т. 3. Вип. 191. С. 115–127. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40
15. ДСТУ 9294:2024. Розрахунок будівель на стійкість до прогресуючого (непропорційного) обвалення. Чинний від 01.03.2025 р. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Захист будівель та споруд», Державне підприємство

«Державний науково–дослідний інститут будівельних конструкцій», 2025. 70 с.

16. ДСТУ 9176:2022. Пожежна безпека. Методи визначення параметрів легкоскопних конструкцій для приміщень та будинків. Основні положення. Чинний від 01.10.2023 р. Вид. офіц. Київ: Технічний комітет стандартизації «Пожежна безпека та протипожежна техніка», 2023. 23 с.

17. ДСТУ–Н Б EN 1991–1–7:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1–7. Загальні дії. Особливі динамічні впливи. Чинний від 01.07.2013 р. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації «Металобудівництво», 2013. 100 с.

18. ДСТУ Б В.1.1–36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Чинний від 01.01.2017 р. Вид. офіц. Київ : УкрНДІЦЗ, 2017. 34 с.

R. Maiboroda, Senior Lecturer of the Department
Yu. Otrosh, DSc, Professor, Head of the Department
 National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ASSESSMENT OF BUILDINGS' RESISTANCE TO PROGRESSIVE COLLAPSE

A computer model has been developed that allows assessing the resistance of a reinforced concrete monolithic building to progressive collapse under the influence of the combined action of fire and internal deflagration explosion. For this purpose, a spatial physically and geometrically nonlinear model of a six-story industrial building was created. The model takes into account the combined operation of load-bearing structures, changes in the thermophysical and mechanical properties of materials under the influence of elevated temperatures, the formation of local destruction, redistribution of internal forces and dynamic effects from explosive loading. The model is implemented in the LIRA-SAPR software package using the “thermal conductivity” module to take into account the temperature effect of a standard fire regime lasting 60 minutes and the “dynamics in time” settings to simulate an impulse load from an explosion of 15 kPa. As a result of the modeling, it was established that the isolated action of a fire leads to an increase in the deflections of the floor slabs by 2.6 times, and an internal explosion leads to an increase in the deflection of the bottom slab by 5.2 times relative to the normal state. The greatest danger is the scenario of the combined impact of fire and explosion, in which the deflection of the lower plate reached 55.8 mm, which exceeds the initial value by 8.3 times. Such deformations, when combined, can potentially cause the loss of the load-bearing capacity of structures and the development of progressive collapse of the building. The results obtained form the basis for increasing the level of structural safety of buildings and reducing the risk of loss of human lives in emergency situations. The proposed approach provides the possibility of a comprehensive assessment of the resistance of reinforced concrete monolithic buildings to progressive collapse under the combined action of thermal and explosive loads, as well as the justification and implementation of effective measures to increase their reliability and survivability.

Keywords: progressive collapse, fire, explosion, LIRA–SAPR, computer model, load combination

References

1. Otrosh, Yu., Maiboroda, R., Romin, A. (2023). Doslidzhennia metodyk rozrakhunku prohresuiuchoho obvalennia. Mekhanika ta matematychni metody, 2, 25–40. doi: 10.31650/2618–0650–2023–5–2–25–40
2. Skob, Y., Dreval, Y., Vasilchenko, A., Maiboroda, R. (2023). Selection of Material and Thickness of the Protective Wall in the Conditions of a Hydrogen Explosion of Various Power. Key Engineering Materials, 952, 121–129. doi: 10.4028/p–ST1VeT
3. Maiboroda, R., Zhuravskij, M., Otrosh, Yu., Karpuntsov, V. (2024). Determination of the Required Area of Easily Removable Structures to Protect Against Progressive Collapse. Key Engineering Materials, 1004, 73–83. doi: 10.4028/p–V0xA6H
4. Tanapornraweekit, G., Haritos, N., Mendis, P. (2011). Behavior of FRP–RC plates under multiple independent air blasts. Journal of Performance of Constructed Fa-

cilities, 25(2), 433–440. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000191

5. Liu, Y., Yan, J., Huang, F. (2018). Behavior of reinforced concrete beams and columns subjected to blast loading. *Defense Technology*, 14(5), 550–559. doi: 10.1016/j.dt.2018.07.026

6. DSTU–N B EN 1991–1–7:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1–7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy. Chynnyi vid 01.07.2013 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo», 81

7. DSTU–N B EN 1990:2008. Yevrokod. Osnovy proiektuvannia konstruktsii. Chynnyi vid 01.07.2009 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet z standartyzatsii «Armatura dlia zalizobetonnykh konstruktsii», 105.

8. Shan, S., Wang, H., Li, S., Wang, B. (2023). Evaluation of progressive collapse resistances of RC frame with contributions of beam, slab and infill wall. *Structures*, 53, 1463–1475. doi: 10.1016/j.istruc.2023.04.114

9. Biloshitska, N., Biloshitsky, M., Tatarchenko, Z., Dyachuk, B. (2022). Mathematical modeling of building structures in complex conditions of chemical production. *Urban planning and territorial planning*, 81, 59–69. doi: 10.32347/2076-815x.2022.81.59-69

10. Almusallam, T., Elsanadedy, H., Abbas, H., Alsayed, S., Al-Salloum, Y. (2010). Progressive collapse analysis of a RC building subjected to blast loads. *Structural Engineering and Mechanics*, 36(3), 301–319. doi: 10.12989/SEM.2010.36.3.301

11. Ding, Y., Chen, Y., Shi, Y. (2016). Progressive collapse analysis of a steel frame subjected to confined explosion and post-explosion fire. *Advances in Structural Engineering*, 19(11), 1780–1796. doi:10.1177/1369433216649381

12. Jahromi, H., Izzuddin, B., Nethercot D. (2012). Robustness assessment of building structures under explosion. *Buildings*, 2(4), 497–518. doi: 10.3390/buildings2040497

13. Luccioni, B., Ambrosini, R., Danesi, R. (2004). Analysis of building collapse under blast loads. *Engineering Structures*, 26(1), 63–71. doi: 10.1016/j.engstruct.2003.08.011

14. Maiboroda, R., Otrosh, Yu. (2023). Doslidzhennia metodyky rozrakhunku stiikosti do prohresuiuchoho obvalennia budivel vnaslidok pozhezhi ta vybukhu. *Komunalne hospodarstvo mist: nauk.–tekhn. zb. Seriia: Tekhnichni nauky ta arkhitektura*, 3(191), 115–127. doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-25-40

15. DSTU 9294:2024. Rozrakhunok budivel na stiikist do prohresuiuchoho (neproportsiinoho) obvalennia. Chynnyi vid 01.03.2025 r. Vyd. ofits. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Zakhyst budivel ta sporud», Derzhavne pidpriemstvo «Derzhavnyi naukovy–doslidnyi instytut budivelnykh konstruktsii», 70.

16. DSTU 9176:2022. Pozhezhna bezpeka. Metody vyznachennia parametriv lehkoskydnykh konstruktsii dlia prymishchen ta budynkiv. Osnovni polozhennia. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Pozhezhna bezpeka ta protypozhezhna tekhnika», 23.

17. DSTU–N B EN 1991–1–7:2010. Yevrokod 1. Dii na konstruktsii. Chastyna 1–7. Zahalni dii. Osoblyvi dynamichni vplyvy. Kyiv : Tekhnichniy komitet standartyzatsii «Metalobudivnytstvo», 100.

18. DSTU B V.1.1–36:2016. Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu. Kyiv : UkrNDITsZ, 34.

Надійшла до редколегії: 22.02.2025

Прийнята до друку: 19.04.2025

УДК 614.8

Ю. П. Ключка¹, д.т.н., с.н.с., проф. каф. (ORCID 0000-0003-1066-4217)

Д. О. Дорошенко², пров. фах. відділу (ORCID 0000-0003-4222-9359)

*¹Харківський національний університет міського господарства
імені О.М. Бекетова, Харків, Україна*

²Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАГРІВАННЯ БАЛОНІВ З ГАЗОМ «ПРОПАН-БУТАН» У ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ

Проведено дослідження балонів з газом пропан-бутан та розроблена математична модель для прогнозування поведінки таких систем під впливом температури. На першому етапі встановлено, що частка тепла, необхідного для нагріву газу, становить від 0,73 до 0,8, а матеріал балону може поглинати від 20 % до 100 % тепла, що суттєво впливає на динаміку прогріву. Для балонів об'ємом 12,7 та 26,2 л лише при коефіцієнті заповнення 0,24 та 0,36, відповідно, кількість необхідного тепла для нагріву газу перевищує кількість для нагріву балону. Дані результати свідчать про значний внесок безпосередньо матеріалу балону в поглинання тепла під час нагрівання балону. На другому етапі розглянуто актуальну проблему безпеки житлових та промислових об'єктів, спричинену широким використанням пропан-бутану, який є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною. Увага приділена ризикам, пов'язаним з нагріванням балонів з пропан-бутаном, що може призвести до підвищення тиску та розгерметизації, викликаючи вибух за сценарієм BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). Обґрунтовано необхідність розробки математичної моделі, яка б дозволяла прогнозувати зміну температурного режиму компонентів балону (стінок, рідини та газу) та тиску пропан-бутану в ньому в реальному часі під впливом зовнішніх факторів, враховуючи складні процеси теплообміну. Розроблена модель ґрунтується на рівнянні нестационарної теплопровідності для корпусу балону з граничними умовами третього роду на зовнішній і внутрішній стінці балона. При побудові моделі враховуються властивості матеріалу балону (теплопровідність, теплоємність, щільність, коефіцієнт теплового розширення), його геометрія (площа поверхні, товщина стінок, форма) тощо. Отримана модель в подальшому дозволить оцінювати температурний розподіл у стінці балону, прогнозувати критичні значення до руйнування та можливого вибуху.

Ключові слова: пропан-бутан, нагрівання, нестационарна теплопровідність, вибух, балон, надзвичайна ситуація

1. Вступ

Пропан-бутан завдяки своїм енергетичним властивостям та відносній доступності, широко застосовується як у побуті, так і в промисловості. Проте, незважаючи на його переваги, він є легкозаймистою та вибухонебезпечною речовиною, що створює значні ризики у разі порушення умов його зберігання, транспортування або експлуатації [1].

У період військової агресії РФ, населення України активно використовує пропан-бутан для приготування їжі, а в деяких випадках і для опалення, що пов'язано з періодичними вимкненнями світла [3, 4]. Це створює додаткові ризики, адже пожежовибухонебезпека балонів з пропан-бутаном, зокрема їх розгерметизація через підвищення тиску та температури, що може призвести до вибуху та визначається кількома ключовими факторами.

По-перше, інциденти, пов'язані з вибухами газу, регулярно стаються по всьому світу, спричиняючи значні матеріальні збитки, руйнування інфраструктури та, найтрагічніше, людські жертви.

По-друге, одним з критичних сценаріїв, що може ініціювати вибух пропан-бутану, є його нагрів, який призводить до підвищення тиску всередині ємності та, як наслідок, до її розгерметизації. Такий процес може розвиватися за сценарієм

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – вибух випаровування рідини, що кипить та розширюється), який характеризується надзвичайною руйнівною силою та великою площею ураження.

По-третє, поточні методи оцінки ризиків та інженерні рішення щодо запобігання газовим вибухам потребують постійного вдосконалення [2]. Це стосується як удосконалення матеріалів для виготовлення газових балонів, так і розробки ефективних систем моніторингу, вентиляції та пожежогасіння.

Таким чином проблема моделювання цих систем та розуміння температурних режимів, що викликають критичне підвищення тиску, є життєво важливим для розробки попереджувальних заходів. А дослідження, спрямовані на моделювання поведінки пропан-бутану при нагріві, а також на аналіз наслідків його розгерметизації та вибуху, дозволять розробляти більш надійні та безпечні системи.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [1] було проведено аналіз наслідків вибухів у житлових будівлях та проведено оцінку часу утворення вибухонебезпечної концентраційної межі поширення полум'я за стаціонарних умов. Тобто автори не враховують можливу зміну температури системи під впливом зовнішніх факторів.

В [5] було наведено проміжні результати експериментальних досліджень щодо динаміки зміни температури та тиску газу при переміщенні балону з відкритого простору з температурою менше 273 К в приміщення. Окрім експериментальних даних наведені також термограми. Поряд з цим відсутні будь які аналітичні залежності, котрі могли б говорити про прогнозування поведінки таких систем.

В роботі [6] розглядаються методологічні аспекти дослідження техногенних вибухів з фокусом на розрахункових методах для визначення їх механізму в рамках судово-експертної практики. Актуальність роботи обґрунтована інтеграцією горючих та вибухонебезпечних речовин у сучасні виробничі та побутові процеси, що обумовлює необхідність превентивних заходів та детального аналізу аварійних подій. У роботі систематизовано розрахункові моделі для аналізу техногенних вибухів у відкритих умовах, приміщеннях та обмежених об'ємах. Представлено математичний апарат для оцінки ключових параметрів, таких як надлишковий тиск (кПа), тротильовий еквівалент вибуху (кг), та радіус ураження, що визначає потенційну руйнівну дію на будівельні конструкції та загрозу для життя.

Особлива увага приділена динаміці розповсюдження газопароповітряних сумішей та визначенню їх концентраційних меж поширення полум'я. Для цього використовуються формули для розрахунку середньої фактичної концентрації газу в приміщенні

$$\phi'_{\text{сер}} = \frac{m_f}{V_{\text{прим}}(1-\eta)} = \frac{m_f}{V_{\text{вільн}}}, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \quad \text{або} \quad \phi_{\text{сер}} = \frac{100m}{V_{\text{вільн}} \rho_{\text{г}}}, \%, \quad (1)$$

де: $\phi'_{\text{сер}}$, $\phi_{\text{сер}}$ – відповідно масова й об'ємна середня фактична концентрація газу у вільному об'ємі приміщення; m_f – маса газу, що надійшла до приміщення за час аварійної ситуації, кг; $V_{\text{прим}}$ – загальний об'єм приміщення, м^3 ; η – частка об'єму приміщення, зайнята обладнанням або меблями; $V_{\text{вільн}}$ – вільний об'єм приміщення, м^3 .

В той же час в роботі параметри системи розглядаються як статичні без можливої зміни температури та підвищення тиску в системі.

Робота [7] присвячена експериментальному дослідженню небезпек, пов'язаних з витоками газу метану та вибухами в повномасштабній житловій будівлі, з акцентом на поведінку неоднорідних газоповітряних сумішей. Хоча вибухи в гомогенних сумішах добре вивчені, реальні сценарії часто характеризуються утворенням неоднорідних сумішей через різницю в густинах метану та повітря. В дослідженні моделюються процеси витоку газу та вибуху в умовах реального житлового приміщення. Розроблено модель розподілу газу у великих просторах, яка базується на апроксимації безрозмірної плавучості як функції безрозмірної висоти та безрозмірного часу. Ця модель дозволяє кількісно описувати формування градієнтних шарів метану в приміщенні. Основні результати показують, що вибухи в неоднорідних сумішах демонструють специфічні характеристики, які відрізняються від гомогенних вибухів. Експерименти виявили вплив локалізації витоку, вентиляції та геометрії приміщення на розподіл газу та динаміку вибуху. Отримані дані є критично важливими для підвищення точності чисельного моделювання вибухів (наприклад, за допомогою програм FLACS) та розробки більш ефективних стратегій безпеки та зменшення ризиків у житлових будівлях. В роботі не розглядаються механізми утворення вибухонебезпечної концентрації та не розглядається поведінка газів, важчих за повітря.

В [8] наведено детальний аналіз руйнувань залізобетонної будівлі внаслідок вибуху зрідженого нафтового газу (LPG), що стався в місті Шанлиурфа, Туреччина. Це дослідження є важливим для розуміння поведінки будівельних конструкцій під впливом вибухових навантажень та розробки методів їх оцінки та проектування для підвищення стійкості. У роботі проведено комплексний аналіз причин вибуху LPG та оцінено його наслідки для триповерхової залізобетонної будівлі. Визначено, що вибух стався в підвалі, спричинивши значні пошкодження конструктивних елементів, включаючи руйнування колон та стін. Розслідування даного випадку є досить актуальним, однак його досить складно адаптувати до житлових будівель, так як інші будівельні вимоги, відсутність отворів, стін та й масштаб бочки з пропан-бутаном є в 1000 разів більшим за балон з газом.

В [9] проведено аналіз ризику несправності в системі запобіжний клапан – резервуар з пропан-бутаном (LPG). Основною метою цього вивчення є аналіз небезпеки витоку пропан-бутанового газу для системи запобіжний клапан – резервуар LPG та розробка корисного методу для швидкого виявлення небезпеки невідповідності запобіжного клапана. Результати аналізу дослідження підтвердили, що запобіжні клапани є базовим захистом установки (резервуара) від несправностей, які можуть призвести до людських жертв, матеріальних збитків та подальших небажаних витрат, спричинених їхньою ненадійністю. В той же час у роботі відсутні будь-які аналітичні залежності, котрі б показали вплив часу, температури на спрацювання запобіжного клапану та формування вибухонебезпечних концентрацій.

Робота [10] присвячена дослідженню ефективності використання газових перегородок (baffles) для запобігання та контролю ризиків, пов'язаних з витоками газу та вибухами в комунальних тунелях. Проблема витоків та вибухів газу в підземних інфраструктурних об'єктах є критично важливою через високу ймовірність катастрофічних наслідків. У роботі застосовано комбінований підхід, що включає чисельне моделювання (CFD, computational fluid dynamics) та експериментальні дослідження для аналізу впливу газових перегородок на дифузію газу, ефективність вентиляції та параметри вибуху. Також було проведено дослідження динаміки поширення витоку газу в тунелі та формування вибухонебезпечних

концентрацій. Моделювання дозволяє візуалізувати зони накопичення газу та оцінити час досягнення нижньої та верхньої меж вибухонебезпечних концентрацій. Результати дослідження демонструють, що використання газових перегородок може значно підвищити рівень безпеки в комунальних тунелях, забезпечуючи більш ефективний контроль над витоками газу та обмежуючи потенційні руйнівні наслідки вибухів. В роботі розглядається варіант з різким збільшенням концентрації метану в тунелі та утворенням вибухонебезпечної концентрації, що не в повній мірі повторює процеси котрі можуть відбуватися з пропан бутаном в значно менших приміщеннях.

У статті [11] розглядається проблема оцінки ризиків у системі постачання газу. У дослідженні проведено системний аналіз ризиків, пов'язаних з різними етапами постачання газу, включаючи видобуток, транспортування, зберігання та розподіл. Розглянуто основні джерела небезпеки, такі як несправності обладнання, людський фактор, природні явища та терористичні загрози. Стаття акцентує увагу на важливості впровадження ефективних систем управління ризиками, що включають заходи з попередження аварій, мінімізації наслідків та відновлення. В той же час в роботі не розглядаються будь-які кількісні показники чи параметри, що не дозволяє говорити про реальну оцінку ризиків.

У статті [12] розглядається судово-інженерний аналіз вибуху, який був спричинений надмірним заповненням пропанового балона. Дослідження базується на методології NFPA 921 "Посібник з розслідування пожеж та вибухів". Проведено інженерний аналіз показань свідків, карт дугового розряду (arc mapping), динаміки пожежі та оцінки характеру пожежних пошкоджень. Причини вибуху оцінювалися з урахуванням NFPA 921, а також застосування інженерного аналізу та розрахунків. Основна увага приділяється гіпотезі про надмірне заповнення пропанового балона як причини інциденту. Аналіз включає вивчення поведінки пропану при зміні температури та тиску, а також функціонування запобіжних клапанів. В даній роботі також не розглядаються будь-які кількісні показники чи параметри, що можуть характеризувати зміну параметрів балону. Також автором не проводиться моделювання системи з підвищення тиску.

У статті [13] представлено базові принципи щодо розвитку пожеж та вибухів. Описуються стадії розвитку пожежі, від початкового займання до повного вигорання, з урахуванням впливу вентиляції, паливного навантаження та геометрії приміщення. Однак в роботі не розглядаються ситуації з впливом пожежі на балони з газом або ж виникнення пожежі чи вибуху в результаті розгерметизації балону.

У статті [14] досліджується безпека житлових будівель під впливом вибухових навантажень від газу. Автори зазначають, що вибух газу, через свою складність та потенційні наслідки, є предметом численних аналізів, оскільки вибухи в обмеженому просторі можуть мати різноманітні наслідки як для мешканців, так і для самої конструкції. Метою цього дослідження є аналіз можливостей захисту конструкції будівлі від наслідків вибуху газу. Аналіз проводився на основі двох аварій, що сталися в житлових будинках. Ключовим аспектом, що розглядається, є ефективність вентиляції як методу захисту будівельних конструкцій. Цей процес спрямований на створення напіввідкритого простору для поширення полум'я, що забезпечує зниження пікового значення тиску вибуху. У житлових будівлях вікна можуть виступати потенційними вентиляційними отворами. Не дивлячись на актуальність роботи автори не наводять тип газу, що приймав участь у вибуху та особливості його утворення, що унеможливорює аналіз чи прогнозування таких НС.

У роботі [15] досліджуються механізми газових вибухів у житлових приміщеннях, зосереджуючись на впливі взаємопов'язаних кімнат та перешкод, а також на інтерпретації термічних пошкоджень. Робота має на меті заповнити прогалини у розумінні динаміки вибухів газу в складних архітектурних конфігураціях. Дослідження базується на кількох експериментальних програмах:

- випробування вибухів газу з вентиляцією у багатосекційній камері (випробування, проведені в 1984 році, були спрямовані на вивчення поширення полум'я між приміщеннями та характеристику термічних пошкоджень після вибуху газу);
- випробування вибухів з вентиляцією в камері об'ємом 180 м³ з масивами перешкод (випробування проведені в 1993 році, ці експерименти мали на меті охарактеризувати поведінку вибуху в присутності перешкод).

Не дивлячись на те, що отримані результати мають важливе значення для покращення моделей прогнозування вибухів, розробки більш ефективних систем безпеки та підвищення точності судових експертиз у справах, пов'язаних з газовими вибухами в житлових приміщеннях в роботі не досліджуються шляхи досягнення пожежовибухонебезпечних ситуацій в приміщенні.

В результаті аналізу встановлено, що на сьогодні відсутня динамічна та проста математична модель, яка б дозволяла достовірно прогнозувати зміну температурного режиму компонентів балону (стінок, рідини та газу) та, що найважливіше, тиску пропан-бутану в ньому в реальному часі з метою прогнозування можливого руйнування та вибуху газу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі теплового стану та тиску в балоні з пропан-бутановою сумішшю, яка дозволить прогнозувати поведінку системи під впливом змінних зовнішніх умов з урахуванням теплообмінних процесів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- проаналізувати та оцінити вплив безпосередньо балону на теплофізичні властивості системи з пропан-бутановою сумішшю;
- сформулювати систему диференціальних рівнянь теплового балансу з урахуванням теплообміну між компонентами системи та із зовнішнім середовищем.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є балон з пропан-бутановою сумішшю, що функціонує як динамічна багатофазна термодинамічна система, яка перебуває у постійному енергетичному та масообмінному взаємозв'язку із зовнішнім середовищем.

Предметом дослідження є динаміка розподілу температури між стінками балону, рідкою та газоподібною фазами пропан-бутану, а також еволюція тиску всередині балону під впливом коливань зовнішньої температури.

Гіпотезою дослідження є суттєвий вплив корпусу балону на теплофізичні властивості системи з пропан-бутановою сумішшю та необхідність врахування даних параметрів при створенні моделі.

Для створення ефективної математичної моделі нагріву балону з пропан-бутаном, яка враховує динаміку температури різних компонентів та фазові переходи, застосовується комплекс дослідницьких методів.

На початковому етапі проводиться системний аналіз об'єкта та предмета дослідження. Це передбачає: визначення меж системи, ідентифікацію ключових факторів, виявлення взаємозв'язків, формулювання припущень.

Методи математичного моделювання, що дозволяють кількісно описати фізичні процеси, а саме: Метод зосереджених параметрів, рівняння теплового балансу, термодинамічні рівняння стану.

5. Розробка математичної моделі нагріву балону

5.1. Порівняння теплоємності балону та газу в ньому

При побудові математичної моделі з оцінки динаміки зміни температури газу в балоні доцільно скористатися рівнянням нестационарної теплопровідності для стінки балону. Складність розрахунків та відсутність можливості побудови аналітичної залежності потребує порівняння теплоємності балону та газу в ньому та підтвердження суттєвого внеску балону в інерційність системи.

З метою оцінки необхідності врахування теплоємності композитного балону без газу та газу окремо проведемо розрахунки. Результати дозволять зробити висновок про доцільність врахування балону, або ж це призведе до спрощення математичної моделі. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики композитних балонів [16]

№ з/п	Об'єм балону, л	Маса балону, кг	Максимальна місткість пропану, кг (суміш С), кг	Максимальна місткість бутану (суміш А), кг	Суміш А1, кг
1	12,7	3,7	5,33	6,35	5,84
2	18,2	4,3	7,64	9,10	8,37
3	24,5	5	10,24	12,20	11,22
4	26,2	5,1	11	13	12

На рис.1. наведено залежність кількості теплоти, необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні.

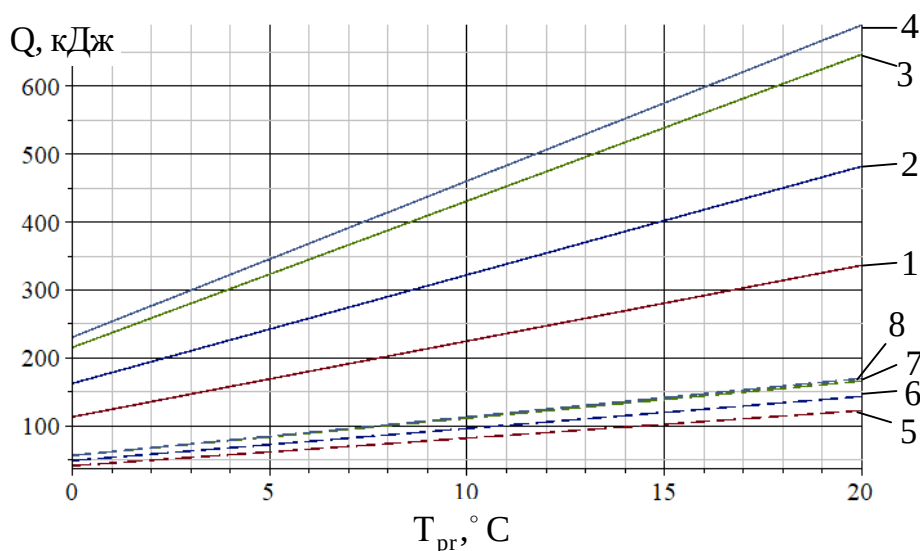


Рис. 1. Залежність кількості теплоти необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні: 1, 5 – №1 табл.1; 2, 6 – №2 табл.1; 3, 7 – №3 табл.1; 4, 8 – №4 табл.1; суцільні лінії – LPG; пунктирні лінії – балон

Аналіз рисунку показує, що частка тепла необхідного для нагрівання саме газу складає від 0,73 до 0,8. Тобто при заповненому балоні на нагрів матеріалу балону може витрачатися близько 20 % тепла.

На наступному етапі було оцінено вплив ступеня заповнення балону на співвідношення необхідної кількості тепла для нагріву балону та газу. Результати наведені на рис. 2 та 3.

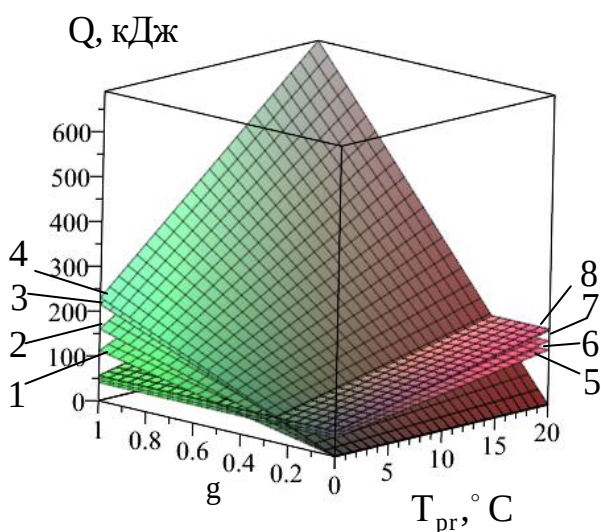


Рис. 2. Залежність кількості теплоти необхідної для нагріву балону та газу в залежності від температури в приміщенні та ступеня заповнення: 1, 5 – № 1 табл. 1; 2, 6 – № 2 табл. 1; 3, 7 – № 3 табл. 1; 4, 8 – № 4 табл. 1; 1-4 – LPG; 5-8 – балон

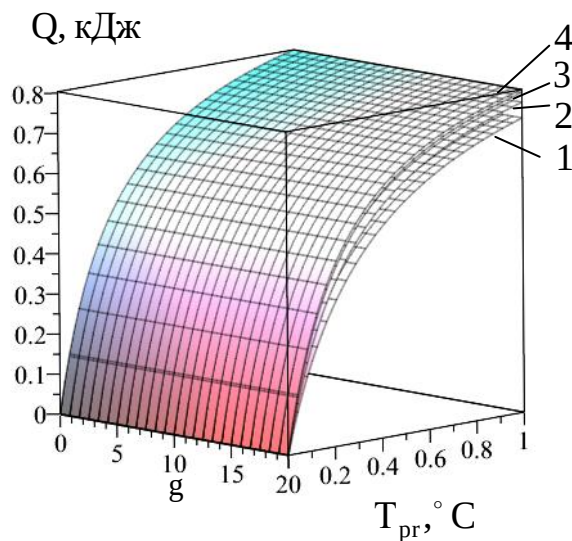


Рис. 3. Частка теплоти необхідної для нагріву газу в загальному обсязі від температури в приміщенні та ступеня заповнення: 1 – № 1 табл. 1; 2 – № 2 табл. 1; 3 – № 3 табл. 1; 4 – № 4 табл. 1

Аналіз рисунків показує, що балон може поглинати значний відсоток (від 20 % до 100 %) кількості тепла необхідного для нагріву балону та газу, і, відповідно, це впливатиме на динаміку прогріву.

Таким чином підтверджено суттєвий вплив корпусу балону на кількість тепла необхідного для нагріву балону та газу в балоні, що необхідно врахувати при створенні математичної моделі.

5.2. Побудова розрахункової схеми нагріву балону та математичної моделі

При створенні математичної моделі нагріву балону з пропан-бутаном при зміні зовнішньої температури слід розглянути комплекс фізичних явищ та властивостей матеріалів. Серед них можна виділити наступні властивості балону:

- матеріал балону:
 - теплопровідність (різні матеріали мають різну теплопровідність, що впливає на швидкість передачі тепла від зовнішнього середовища до газу всередині);
 - теплоємність (властивість матеріалу поглинати тепло);
 - щільність (важлива для розрахунку теплової інерції балону);
 - коефіцієнт теплового розширення (хоча його вплив на загальний об'єм балону може бути незначним, він може бути важливим для точних розрахунків напружень);
- геометрія балону:
 - площа поверхні (чим більша площа поверхні, тим більша площа контакту із зовнішнім середовищем і тим швидше відбувається теплообмін);

- товщина стінок (товстіші стінки матимуть більшу теплову інерцію та повільніше реагуватимуть на зміни температури);
- Форма (циліндрична форма є типовою, але наявність вигинів або нерівностей може незначно впливати на конвекцію);
- емісійна здатність та коефіцієнт поглинання поверхні (колір та стан поверхні балону (глянцева, матова, пофарбована) впливають на поглинання сонячної радіації та випромінювання тепла).

Поряд з властивостями балону слід врахувати властивості пропан-бутану, серед яких: фазовий стан (пропан-бутан у балоні знаходиться у двох фазах: рідкій та газоподібній); теплоємність, теплопровідність та густину; в'язкість (може впливати на конвекцію всередині балону, хоча цей ефект може бути менш значущим, ніж інші).

В процесі розгляду теплообмінних процесів слід дослідити такі явища:

- конвекція (теплообмін між поверхнею балону та навколишнім повітрям);
- випромінювання (теплообмін між поверхнею балону та навколишніми об'єктами (земля, будівлі, небо));
- теплопровідність (передача тепла через стінки балону від зовнішньої поверхні до газу/рідини всередині).

Також можна розглядати:

- об'єм газу/рідини у балоні (кількість газу та рідини впливає на теплоємність системи та динаміку нагріву);
- наявність інертних газів (хоча пропан-бутан є основним компонентом, наявність невеликих домішок інших газів може незначно впливати на теплофізичні властивості суміші);
- наявність ізоляції (якщо балон ізольований, це значно зменшить швидкість теплообміну із зовнішнім середовищем).

В той же час не завжди потрібно враховувати всі можливі фактори, оскільки це може призвести до надмірної складності моделі без істотного покращення її точності. Рішення про те, які фактори включити, залежить від конкретних цілей моделювання, доступних ресурсів та необхідної точності. Деякі фактори можуть мати незначний вплив на кінцевий результат порівняно з основними рушійними силами, такими як зовнішня температура, а їхнє врахування лише збільшить обчислювальне навантаження та час розробки. Крім того, якщо дані для певних факторів є неточними або їх важко отримати, їх включення може фактично внести більше похибок, ніж користі, погіршуючи передбачувальну силу моделі. Тому, для отримання функціональної та ефективної моделі, яка відповідає поставленим завданням, доцільно зосередитися на ключових фізичних процесах та властивостях, які мають найбільший і найочевидніший вплив на динаміку температури та тиску в балоні.

Спрощену схему балону під час нагріву газу в приміщенні можна представити у вигляді рис. 4.

В такому разі рівняння теплопровідності для корпусу балону можна записати в наступному вигляді [17]

$$\frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right), \quad (2)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності; $T(r, \tau)$ – величина температури в точці на відстані r в момент часу τ .

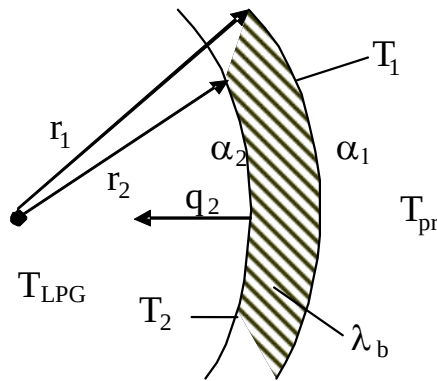


Рис. 4. Розрахункова схема нагріву стінки балону: λ_b – коефіцієнт теплопровідності матеріалу балону; T_{LPG} , T_{pr} – температура газу та температура в приміщенні; r_1 , r_2 – зовнішній та внутрішній радіус балону; T_1 , T_2 – температура зовнішньої та внутрішньої стінки балону; α_1 , α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої та внутрішньої стінки балону; q_2 – тепловий потік від внутрішньої стінки

Приймемо граничні умови третього роду на зовнішній і внутрішній стінці балона. Тоді можна записати

$$\lambda_b \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 (T_{pr} - T_1); \quad (3)$$

$$\lambda_b \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{LPG}). \quad (4)$$

Початкові умови можна записати

$$T(r, 0) = T_0, \quad (5)$$

Також слід враховувати, що T_{LPG} і q_2 взаємопов'язані, тобто

$$T_{LPG} = f(S_{wb}, T_2, m_{LPG}, \alpha_2), \quad (6)$$

де S_{wb} – площа, через яку проходить тепловий потік q_2 ; m_{LPG} маса газу в балоні.

Коефіцієнт тепловіддачі в балоні можна визначити, виходячи з виразу [18]

$$Nu = \frac{\alpha_2 \cdot L}{\lambda_{LPG}}, \quad (7)$$

де Nu – критерій подоби теплових процесів, що характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та інтенсивністю теплообміну за рахунок теплопровідності; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі; λ_{LPG} – коефіцієнт теплопровідності; L – характерний розмір.

Усереднене значення $\overline{Nu}$ для випадку вільної конвекції в можна визначати відповідно до виразу

$$\overline{Nu} = \left[0,6 + \left(0,387 \frac{Gr \cdot Pr}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{16/9}} \right)^{1/6} \right]^2, \quad Gr \cdot Pr \in (10^{-5}; 10^{12}), \quad (8)$$

де Pr – критерій подоби теплових процесів у рідинах і газах, що враховує вплив фізичних властивостей теплоносія на тепловіддачу ($0,75 < Pr < 1$ для багатоатомних газів [18]); Gr – критерій подоби теплообміну при вільному русі у полі гравітації.

Значення Gr визначалося відповідно до виразу

$$Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_{LPG})L^3}{\nu^2}, \quad (9)$$

де: g – прискорення вільного падіння, $g=9,81$ м/с²; L – визначальний лінійний розмір поверхні теплообміну, м; T_2 – температура поверхні теплообміну, К; T_{LPG} – температура, К; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Для газів $\beta = (T_{LPG})^{-1}$, К⁻¹.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості визначається відповідно до

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (10)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Тоді, з урахуванням (2–10) математичну модель можна представити у вигляді (11).

З метою рішення системи (11) планується розбиття простору часу на невеликі кроки. Потім застосування рівнянь теплового балансу до кожного елемента на кожному часовому кроці на основі рішення рівняння нестационарної теплопровідності.

З метою рішення системи (11) планується розбиття простору часу на невеликі кроки. Потім застосування рівнянь теплового балансу до кожного елемента на кожному часовому кроці на основі рішення рівняння нестационарної теплопровідності.

6. Обговорення результатів розробки математичної моделі з оцінки параметрів балонів з пропан-бутаном

Отримані результати щодо оцінки впливу корпусу балону на систему в цілому показали, що існує суттєвий вплив теплоємності матеріалу балону на термодинамічні процеси системи, та складає від 20 % до 100 % в залежності від ступеня заповнення системи. Дані результати пояснюються відносно невеликою масою газу, його щільністю та теплоємністю. З іншого боку відносно великою масою балону, Fire Safety. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-13

особливо при його частковому заповненні газом.

Отримані результати, а саме розроблена математична модель, дозволяють провести моделювання балону з газом та отримати проміжні значення на різних етапах моделювання.

Особливістю запропонованого підходу є: врахування геометричних параметрів балону; розрахунок на основі рівняння нестационарної теплопровідності, що в повній мірі дозволяє отримати комплекс всіх величин на протязі всього часу моделювання; можливості врахування типу газової суміші в залежності від сезону року, тощо.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau) = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} T(r, \tau) + \frac{\frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau)}{r} \right), \\ \lambda_b \frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 (T_{pr} - T_1), \\ \lambda_b \frac{\partial}{\partial r} T(r, \tau) \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{LPG}), \\ T(r, 0) = T_0, \\ T_{LPG} = f(S_{wb}, T_2, m_{LPG}, \alpha_2), \\ Nu = \frac{\alpha_2 \cdot L}{\lambda_{LPG}}, \\ Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_{LPG})L^3}{v^2}, \\ v = \frac{\eta}{\rho}, \\ P_{LPG} = \varphi(T_{LPG}, m_{LPG}). \end{array} \right. \quad (11)$$

Дослідження обмежується рівномірним впливом температурного потоку на всю поверхню балону. Також модель передбачає вирішення рівняння нестационарної теплопровідності для циліндричної системи. Не враховуються як сферичні чи плоскі частки балону.

Серед недоліків вкажемо на прийняття усереднених параметрів балонів, характеристик газу в балоні у зв'язку з великим вибором їх на ринку та варіативністю складу газу в балоні.

Розвиток даного дослідження полягає в детальному дослідженні математичної моделі, розробці спрощених підходів до оцінки зміни температурного режиму балону та тиску в ньому, а також розробці регресійних моделей. На основі отриманих результатів також будуть розроблені номограми для оперативного визначення часу ймовірного руйнування балону та можливого вибуху.

Поряд з цим доцільно провести експериментальні дослідження для підтвердження математичної моделі. При цьому необхідно на високому рівні забезпечити безпеку проведення експерименту з використанням вибухонебезпечного газу.

7. Висновки

1. Встановлено, необхідність врахування впливу корпусу балону на теплові процеси, оскільки аналіз показав, що матеріал балону може поглинати від 20 % до 100 % тепла, необхідного для його нагріву та нагріву газу, що суттєво впливає на динаміку прогріву системи. На рис. 3. наведені результати розрахунків. Для балонів об'ємом 12,7 та 26,2 л лише при коефіцієнті заповнення 0,24 та 0,36, відповідно, кількість необхідного тепла для нагріву газу перевищує кількість для нагріву балону.

2. Сформульовано систему диференціальних рівнянь для визначення параметрів газу в балоні на основі рівняння нестационарної теплопровідності. Це дасть змогу оцінювати температурний розподіл у стінці балону та прогнозувати критичні значення, що можуть призвести до його руйнування та вибуху. Математична модель базується на рівнянні нестационарної теплопровідності для корпусу балону з граничними умовами третього роду на зовнішній і внутрішній стінці, що забезпечує її відповідність реальним фізичним процесам теплообміну при температурах в приміщенні (до 60 °C). Вона обмежується рівномірним впливом температурного потоку на всю поверхню балону. Також модель передбачає вирішення рівняння нестационарної теплопровідності для циліндричної системи, але в подальших дослідженнях буде проведена оцінка похибки з урахуванням сферичних та плоских частин балону.

Література

1. Дорошенко Д. О., Ключка Ю. П., Михайлюк О. П. Аналіз наслідків вибухів та умов утворення газоповітряних сумішей у житлових будівлях. Проблеми пожежної безпеки. 2020. Вип. 48. С. 37–44. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8
2. ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT). URL: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>
3. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2024 року. Київ, 2025. С. 39. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Ключка Ю. П., Дорошенко Д. О. Експериментальна оцінка тиску пропан-бутану в балоні при його нагріванні. Сталий розвиток міст: пост воєнний період: Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. 2025. С. 237–239. URL: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/stalyirozvytok2019/2025/C_3_Budivelna_ta_civilna_inzeneria_25.pdf
6. Гусейнов Р. Н., Панчук Ю. В. Основні розрахункові методи дослідження обставин і механізму техногенних вибухів. Теорія та практика судової експертизи і криміналістики. 2021. № 23. С. 258–269. doi: 10.32353/khrife.1.2021.20
7. Chengjun Y., Li C., Li Zh., Feng B., Ruizhi Xu. Research on the hazards of gas leakage and explosion in a full-scale residential building. Defence Technology. 2025. Vol. 43. P. 168–181. doi: 10.2139/ssrn.4770361
8. Turgut P., Gurel M., Pekgokgoz R. LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A casestudy in Sanliurfa, Turkey. Engineering Failure Analysis. 2013. Vol. 32. P. 220-235. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.004

9. Krzysiak Z., Samociuk W., Bartnik G., Plizga K., Dziki D., Kaliniewicz Z., Nieoczym A., Wyciszkievicz A., Otto T. Analysis of tank safety with propane-butane on LPG distribution station. *Pol. J. Chem. Technol.* 2017. Vol. 19. P. 99–102. doi: 10.1515/pjct-2017-0074
10. Baobin G., Wenjie Z., Chuangnan R., Shaopeng S., Chenhui G. Study of the effect of gas baffles on the prevention and control of gas leakage and explosion hazards in autility tunnel. *Applied Sciences.* 2023. Vol. 13. Isse 7. P. 1–19. doi: 10.3390/app13074264
11. Ismail M., Sharif K., Udin Z., Hassan M., Nawi M., Hamid Z., Ibrahim J., Othman A. A risk assessment in natural gas supply. *International Journal of Supply Chain Management.* 2018. Vol.7. №4. P. 180-184. doi: 10.59160/ijscm.v7i4.2371
12. Tindal J. Forensic engineering analysis of an explosion allegedly caused by an overfilled propane cylinder. *Journal of the NAFE.* 2018. Vol. 35. № 2. P. 81–99. doi: 10.51501/jotnafe.v35i2.62
13. Nick C., Mark S., Martin S., Peter F. et al. Fire investigation: a primer for courts. 2023. P. 1-68. URL: <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-fire-investigation.pdf>
14. Chmielewski R., Bąk A. Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. *Journal of Building Engineering.* 2021. Vol. 43. doi: 10.1016/j.job.2021.102815
15. Tomlin G. Gas explosions in dwellings, the effects of interconnected rooms and obstacles, and the interpretation of thermal damage. 2015. P. 1-480. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/10599/>
16. Паспорт композитного газового балону. URL: <https://gazballon.com.ua/wp-content/uploads/2016/11/pasport.pdf>
17. Драганов Б. Х., Бессараб О. С., Долінський А. А., Лазоренко В. О., Міщенко А. В. *Теплотехніка.* Київ. 2005. С. 400. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/9bfb192a-a15b-4685-aa97-975ec8978dc3/content>
18. Рябова І. Б., Сайчук І. В., Шаршанов А. Я. *Термодинаміка і теплопередача у пожежній справі.* Харків. 2002. С. 352. URL: http://www.univer.nu.czu.edu.ua/tmp_metod/467/Titul.pdf

Y. Klyuchka¹, DSc, Senior Researcher, Professor

D. Doroshenko², Specialist of the Department

¹National University of Urban Economy named by O.M. Beketov, Kharkiv, Ukraine

²National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MATHEMATICAL MODEL OF HEATING OF PROPANE-BUTANE GAS CYLINDERS IN RESIDENTIAL BUILDINGS

This study investigates propane-butane gas cylinders and develops a mathematical model to predict the behavior of such systems under thermal influence. In the first stage, it was established that the share of heat required for gas heating ranges from 0.73 to 0.8, and the cylinder material can absorb from 20% to 100% of the heat, which significantly affects the heating dynamics. For cylinders with volumes of 12.7 and 26.2 liters, only at fill ratios of 0.24 and 0.36, respectively, does the amount of heat required for gas heating exceed the amount for cylinder heating. These results indicate a significant contribution of the cylinder material itself to heat absorption during cylinder heating. The second stage addresses the urgent safety problem of residential and industrial facilities caused by the widespread use of propane-butane, which is a highly flammable and explosive substance. Attention is paid to the risks associated with heating propane-butane cylinders, which can lead to increased pressure and depressurization, causing an explosion according to the BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) scenario. The

necessity of developing a mathematical model is substantiated, which would allow predicting the change in the temperature regime of cylinder components (walls, liquid, and gas) and the pressure of propane-butane within it in real-time under the influence of external factors, taking into account complex heat exchange processes. The developed model is based on the unsteady heat conduction equation for the cylinder body with third-kind boundary conditions on the outer and inner walls of the cylinder. The model construction considers the properties of the cylinder material (thermal conductivity, heat capacity, density, thermal expansion coefficient), its geometry (surface area, wall thickness, shape), etc. The obtained model will subsequently allow evaluating the temperature distribution in the cylinder wall, predicting critical values leading to failure and possible explosion.

Keywords: propane-butane, heating, unsteady heat conduction, explosion, cylinder, emergency

References

1. Doroshenko, D. O., Klyuchka, Y. P., Mykhaylyuk, O. P. (2020). Analiz naslidkiv vybukhiv ta umov utvorennia hazopovitryanykh sumishey u zhytlovykh budivlyakh. *Problemy pozhezhnoyi bezpeky*, 48, 37–44. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2020_48_8
2. DSTU IEC/ISO 31010:2013. (2013). Keruvannya ryzykom. Metody zahal'noho otsynuvannya ryzyku (IEC/ISO 31010:2009, IDT). Available at: <https://khoda.gov.ua/image/catalog/files/dstu%2031010.pdf>
3. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2024 roku. Kyiv, 39. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/3/0/1/6/1/2/analitichna-dovidka-pro-pozezi-za-12-misiaciv-2024-na-sait.pdf>
4. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misyatsiv 2023 roku. Available at: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf>
5. Klyuchka, Y. P., Doroshenko, D. O. (2025). Eksperymental'na otsinka tysku propan-butanu v baloni pry yoho nahrivanni. *Stalyy rozvytok mist: postvoyennyy period: Materialy Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi*. Kharkiv: KHNUMH im. O. M. Beketova, 237–239. Available at: https://science.kname.edu.ua/images/dok/konferentsii/stalyirozvytok2019/2025/C_3_Budivelna_ta_civilna_inzeneria_25.pdf
6. Huseynov, R. N., Panchuk, Y. V. (2021). Osnovni rozrakhunkovi metody doslidzhennya obstavyn i mekhanizmu tekhnohennykh vybukhiv. *Teoriya ta praktyka sudovoyi ekspertyzy i kryminalistyky*, 23, 258–269. doi: 10.32353/khrife.1.2021.20
7. Chengjun, Y., Li, C., Li, Zh., Feng, B., Xu., R. (2025). Research on the hazards of gas leakage and explosion in a full-scale residential building. *Defence Technology*, 43, 168–181. doi: 10.2139/ssrn.4770361
8. Turgut, P., Gurel, M., Pekgokgoz, R. (2013). LPG explosion damage of a reinforced concrete building: A casestudy in Sanliurfa, Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 32, 220–235. doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.004
9. Krzysiak, Z., Samociuk, W., Bartnik, G., Plizga, K., Dziki, D., Kaliniewicz, Z., Nieoczym, A., Wyciskiewicz, A., Otto, T. (2017). Analysis of tank safety with propane-butane on LPG distribution station. *Pol. J. Chem. Technol*, 19, 99–102. doi: 10.1515/pjct-2017-0074
10. Baobin, G., Wenjie, Z., Chuangnan, R., Shaopeng, S., Chenhui, G. (2023). Study of the effect of gas baffles on the prevention and control of gas leakage and explosion hazards in utility tunnel. *Applied Sciences*, 13, 7, 1–19. doi: 10.3390/app13074264
11. Ismail, M., Sharif, K., Udin, Z., Hassan, M., Nawi, M., Hamid, Z., Ibrahim, J., Othman, A. (2018). A risk assessment in natural gas supply. *International Journal of Fire Safety*. DOI: 10.52363/2524-0226-2025-41-13

Supply Chain Management, 7, 4, 180–184. doi.org/10.59160/ijscm.v7i4.2371

12. Tindal, J. (2018). Forensic engineering analysis of an explosion allegedly caused by an overfilled propane cylinder. Journal of the NAFE, 35, 2, 81–99. doi:10.51501/jotnafe.v35i2.62

13. Nick, C., Mark, S., Martin, S., Peter, F., et al. (2023). Fire investigation: a primer for courts, 1–68. Available at: <https://royalsociety.org/-/media/about-us/programmes/science-and-law/royal-society-fire-investigation.pdf>

14. Chmielewski, R., Bąk, A. (2021). Analysis of the safety of residential buildings under gas explosion loads. Journal of Building Engineering, 43. doi:10.1016/j.jobbe.2021.102815

15. Tomlin, G. (2015). Gas explosions in dwellings, the effects of interconnected rooms and obstacles, and the interpretation of thermal damage, 1–480. Available at: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/10599/>

16. Pasport kompozitnogo gazovogo balonu. Available at: <https://gazballon.com.ua/wp-content/uploads/2016/11/pasport.pdf>

17. Drahanov, B. K., Bessarab, O. S., Dolins'kyy, A. A., Lazorenko, V. O., Mishchenko, A. B. (2005). Teplotekhnika. Kyiv, 400. Available at: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/9bfb192a-a15b-4685-aa97-975ec8978dc3/content>

18. Ryabova, I. B., Saychuk, I. V., Sharshanov, A. Y. (2002). Termodynamika i teploperedacha u pozhezhniy spravi. Kharkiv, 352. Available at: http://www.univer.nuczu.edu.ua/tmp_metod/467/Titul.pdf

Надійшла до редколегії: 23.02.2025

Прийнята до друку: 22.04.2025