ISSN 2524-0226

ПРОБЛЕМИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

2(40)2024

Content / Зміст

Дурєєв В. О., Христич В. В., Бондаренко С. М., Антошкін О. А., Маляров М. В. Розробка математичної моделі магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача 4
Заїка Н. П. Закономірності розподілу температури сталевої балки з вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу пожежі 17
Кірєєв О. О., Гапон Ю. К., Чиркіна-Харламова М. А., Слепужніков Є. Д., Черкашин О. В. Вибір найбільш ефективного засобу гасіння легкозаймистих рідин 30
Лесько А. А., Кулаков О. В., Домолега С. О. Модель примусового осадження важких небезпечних газів 44
Карпов А. А., Кустов М. В. , Кулаков О. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Взаємодія електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини 57
Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A., Sharshanov A., Goncharenko Y., Shcherbak S. Silicophosphate fireproof composition for building finishing materials 72
Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель форми і розмірів розливу при витіканні і горінні рідини 86
Остапов К. М., Чаплигін О. С., Лісняк А. А., Грицина І. М., Шевченко С. М., Криворучко Є. М. Оптимізація складу нейтральних газів для пожежогасіння у фондосховищах музеїв 99
Степаненко В. О., Нуянзін О. М., Перегін А. В., Кришталь Д. О., Копитін Д. Е. Результати прогріву сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі 113
Коваленко Р. І., Калиновський А. Я., Назаренко С. Ю., Журавський М. М. Закономірності виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах України 126
Сідней С. О. Уточнений метод оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності 139
Дубінін Д. П. Вимірювальний комплекс для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою 154
Tregubov D., Kireev O., Kyazimov K., Trefilova L., Slepuzhnikov E., Vavreniuk S. Fire extinguishing development directions for liquids based on the foam glass primary layer 165
Ковальов О. О., Ядченко Д. М., Мельниченко А. С., Собина В. О., Тарадуда Д. В., Панченко О. Г. Математична модель ймовірності виявлення точкової цілі оператором безпілотного літального апарата 185
Артем'єв С. Р., Рибалова О. В., Бригада О. В., Ілїнський О. В., Мацак А. О. Вивчення процесу замулення пристроїв інфільтрації дощового стоку з різними фільтруючими насадками 201
Рудаков С. В., Миргород О. В., Петухова О. А., Пирогов О. В., Щолоков Е. Е., Корнієнко Р. В. Реалізація безпеки пасажирів при порушенні герметичності салону літака у висотних польотах 218
Несух М. М., Субота А. В., Швиденко А. В., Некора О. В. Динамічні процеси при відриві резервуара від днища внаслідок пожежі 235
Толок І. В., Рибка Є. О., Поздєєв С. В., Кустов М. В. Новгородченко А. Ю., Пліско Ю. В. Закономірності поведінки залізобетонних конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху 258
Тютюник В. В., Лєвтєров О. А., Тютюник О. О., Усачов Д. В. Акустичний моніторинг джерел надзвичайних ситуацій, пов'язаних із застуванням вогнепальної зброї 269

УДК 699.8+641.8+628.31+624.01+623.45+614.8+519.6+504.05+351.86

Проблеми надзвичайних ситуацій. Черкаси: НУЦЗ України, 2024. № 2(40). 292с.

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); **Дурєєв 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 «ХПІ», Харків (Україна); **Землянський О.М.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Кірєєв 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); **Маляров 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); **Нуянзін 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); **Поспєлов Б. Б.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Саєнко 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); **Тютюник В. В.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Черкаси (Україна); **Христич О. В.,** к.т.н., доцент, НТУ «ХПІ», 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); **Фумиан Франческа,** PhD, Римський університет Тор Вергата, Рим (Італія); **Малізія Андреа,** PhD, Римський університет Тор Вергата, Рим (Італія); **Мугаверо Роберто,** PhD, Університет Республіки Сан-Маріно, Сан-Маріно (Італія); **Муландане Фернандо Чаниссо,** PhD, Університет Едуардо Мондлане, Мапуту (Мозамбік), **Телак 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 Нацради 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
№ 6 від 27.12.2024

Підписано до друку
27.12.2024

Формат 60x84/16
Папір 80 г/м^2
Ум. друк. арк. 15,8
Тираж 100 прим.
Вид. № 61/24

© Національний університет цивільного захисту України, 2024

UDC 699.8+641.8+628.31+624.01+623.45+614.8+519.6+504.05+351.86

Problems of Emergency Situations. Cherkasy: NUCP Ukraine, 2024. № 2(40). 292 p.

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, NUCDU, Cherkasy (Ukraine) – Editor in Chief; **Kustov Maksym,** DSc, Professor, NUCDU, 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, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Hovalenkov Serhii,** PhD, Associate Professor, NUCDU, 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); **Dubinin Dmytro,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Dureev Viatcheslav,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Zhuravskij Maxim,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Zaitsev Roman,** DSc, Associate Professor, NTU «KhPI», Kharkiv (Ukraine); **Zemlianskyi Oleh,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Kireev Oleksandr,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Kyrychenko Oksana,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Koloskov Volodymyr,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Kondratenko Oleksandr,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Kostenko Tetiana,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Lisniak Andrii,** PhD, Associate Professor, NUCDU, 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, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Meleshchenko Ruslan,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Minska Natalia,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Nuianzin Oleksandr,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Otrosh Yurii,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Ponomarenko Roman,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Pospelov Borys,** DSc, Professor, NUCDU, 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, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Trefilova Larysa,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Tiutiunyk Vadym,** DSc, Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Khrystych Olena,** PhD, Associate Professor, NTU «KhPI», Kharkiv (Ukraine); **Sharshanov Andriy,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Cherkasy (Ukraine); **Iurchenko Valentyna,** DSc, Professor, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv (Ukraine); **Emen Fatih Mahmet,** 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 Defence 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 NUCDU
№ 6 dated 27.12.2024

Signed for print
27.12.2024

Format 60x84/16
Paper 80 g/m^2
Condit. print. sheet. 15,8
Circulation 100 cop.
Publ. № 61/24

© National University of Civil Protection of Ukraine, 2024

УДК 614.8

В. О. Дурєєв, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)*
В. В. Христич, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-5900-7042)*
С. М. Бондаренко, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)*
О. А. Антошкін, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-2481-2030)*
М. В. Маляров, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4052-7128)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ МАГНІТНОКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА

Розроблено математичні моделі пожежного сповіщувача з урахуванням залежності намагніченості контактів чутливого елементу від температури та параметрів матеріалу контактів. Отримані рівняння динаміки СП ураховують тип та структуру матеріалів контактів ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній у відносних змінних з постійними коефіцієнтами. В результаті вивчення актуальної літератури в моделях враховано характеристики матеріалу магнітних контактів для визначення його оптимальних динамічних параметрів. Математичною моделлю сповіщувача є система рівнянь, що складається з рівняння теплового балансу в умовах нестаціонарного теплообміну з припущенням рівномірного прогріву контактів чутливого елемента по усій глибині. Друге – рівняння зв'язку намагніченості контактів, запаяних в герконі, від температури. Отримані рівняння динаміки сповіщувача ураховують тип та структуру матеріалів контактів ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку. Змінні рівняння є відносними щодо крапки лінеаризації, з постійними коефіцієнтами. Рівняння дозволяють проводити дослідження параметрів роботи сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури. Рівняння динаміки дозволяють досліджувати динамічні параметри роботи теплових СП, відносна погрішність результатів не перевищує 5 %. Отримані результати моделювання роботи пожежного сповіщувача підтверджують правильність обраної гіпотези, а визначені параметри роботи СП співпадають з даними експерименту. Результати проведених досліджень дозволяють надати рекомендації по вибору параметрів роботи сповіщувачів, що покращить якість їх спрацювання: статичну та динамічну температури спрацювання, інерційність, час спрацювання.

Ключові слова: сповіщувач пожежний, чутливий елемент, модель сповіщувача, постійна часу, час спрацьовування, температура спрацьовування сповіщувача

1. Вступ

Використання сповіщувачів пожежних (СП) з чутливим елементом (ЧЕ), що працює за принципом залежності магнітної індукції від температури обумовлено простотою їх експлуатації, надійністю роботи та вигідними тактико-технічними параметрами відносно їх вартості.

В якості ЧЕ такого теплового СП виступає герметичний контакт, який містить в своєму складі контакти з магнітночутливого матеріалу, який змінює свої магнітні властивості при зміні температури оточуючого середовища.

Матеріал контактів та його структура впливають на параметри спрацювання такого СП і визначаються динамічними параметрами складових ЧЕ в умовах зміни їх теплового стану. В свою чергу, залежність намагніченості контактів ЧЕ визначається їх складовою речовиною. Ураховуючи різноманіття речовин, що можуть бути застосовані в якості магнітних контактів ЧЕ, параметри спрацювання таких СП значно відрізняються один від одного. Паспорт теплових СП практично не містить технічні данні ЧЕ і не описує динамічні параметри роботи СП в умовах, коли оточуюча температура змінюється. Відповідно, щоб покращити якість роботи системи протипожежного захисту, треба змоделювати спрацювання теп-

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

лового СП в умовах зміні температури оточуючого середовища для типової структури матеріалу його контактів, що є дуже важливим для визначення параметрів спрацьовування СП.

Тому актуальним є проведення досліджень, направлених на розробку сповіщувачів пожежних з покращеними динамічними параметрами.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] наведені результати досліджень зміни температури поверхні з урахуванням висоти джерела високоінтенсивного теплового потоку. Визначені параметри спрацювання теплового СП. Показано можливість застосування наведеного методу визначення параметрів роботи перспективних теплових СП на підставі співпадіння отриманих результатів моделювання з паспортними даними існуючих СП. Проте, дослідження роботи ЧЕ з залежністю магнітної індукції від температури в наведеній публікації не проводилося.

В [2] представлені результати досліджень намагніченості м'яких феритів при різній температурі. Зроблено висновок, коли при загальній нелінійній залежності намагніченості від температури, для робочого діапазону (20÷100) °С залежність наближується до лінійній з похибками, що перевищують заданих значень. Такий результат цілком задовольняє застосування м'яких феритів в якості контактів ЧЕ СП. Проте моделювання застосування м'яких феритів в якості контактів ЧЕ СП не проводилося.

В [3] проводилися дослідження температурного впливу зовнішнього середовища на магнітну індукцію фериту. Дослідження виконані для умов максимального показника намагніченості для м'яких феритів. Отримані результати дозволяють визначити величину магнітної індукції феритів в умовах зміни напруги. Визначено, що величина магнітної індукції фериту зменшується при збільшені температури в діапазоні (0÷60) °С. Представлено теоретичне обґрунтування наведеної залежності, що математично описує зміну намагніченості фериту при зміні температури у м'якому марганець-цинковому фериті та обумовлено можливість застосування даних типів феритів у якості ЧЕ теплового СП для практичних температурних інтервалів роботи. Аналітичних рівнянь для визначення намагніченості не представлено.

В [4] наведено приклад визначення структури Mn–Zn фериту з визначеними магнітними властивостями для різних температур. В межах (8,36÷17,54) нм визначено структуру та розмір кристалічної решітки фериту з заданими параметрами намагніченості, подібними параметрам м'яких феритів. Проте математичного моделювання роботи Mn–Zn фериту в умовах зміни температури не проводилося. Рівнянь залежності магнітних властивостей Mn–Zn фериту від температури також не наведено.

В [5] виконана робота по створенню фериту з визначеними параметрами структурної решітки та намагніченості. В роботі наведено зразки та магнітні параметри наночасток та структури феритів з урахуванням типу їх кристалічної решітки. Виконані експериментальні дослідження структури і намагніченості феритів в діапазоні температур, що задовольняє їх практичне застосування (–160÷130) °С. Показано функціональну залежність магнітних властивостей розроблених феритів від значень температури і магнітних властивостей оточуючого поля. Наведено формули для отримання рівня магнітної індукції в умовах зміни оточуючої температури. Проте моделей застосування феритів в якості ЧЕ теплового СП не приведено.

В [6] проведені дослідження впливу структури, розміру часток та кристалічної решітки феритів різної структури на параметри їх намагніченості. Представлено результати з визначення середнього розміру феритних часток та їх структури. Визначено вплив часу формування структури однотипних феритних матеріалів на параметри їх намагніченості. Виявлено зв'язок магнітних властивостей феритів від зміни часу та температури формування структури та кристалічної решітки. Проте питання щодо застосування феритів в якості чутливого елементу, який реагує на зміну температури, не розглянуто.

В [7] наведено графічні залежності, отримані при досліджені намагніченості м'яких NiCoZn феритів. Доведено, що представлені матеріали мають виражені залежності магнітних властивостей від температури. Визначено та теоретично обгрунтовано механізм впливу структури матеріалу на його магнітні властивості. Показано формули для визначення магнітного моменту від молекулярної маси і магнітного рівня матеріалу. Наведені значення отриманих магнітних властивостей фериту, та показано їх залежність від структури та температури. Однак, залежностей для визначення магнітних властивостей феритів не приведено.

В [8] розглянуто температурний вплив на сердечник з фериту з різною структурою його матеріалу та доміжками SiO_2. Наведені результати магнітних властивостей фериту з урахуванням його структури та концентрації доміжок. Температурний вплив на зміну намагніченості фериту не досліджувався.

В [9] наведено результати моделювання впливу температури та зовнішніх сил на намагніченість магнітом'яких феритів. Представлено графоаналітичні залежності, отримані в результаті дослідження намагніченості феритів різної структури при змінному зовнішньому впливі. Показано, що урахування структури фериту дозволяє більш точно визначити його намагніченість. В роботі представлено структурні моделі магнітом'яких феритів, що дозволяє визначити їх намагніченість для різних температур та зовнішньому впливі. Проте в роботі не наведено аналітичні залежності для визначення намагніченості феритів з урахуванням їх структури, а представлені графічні залежності не дозволяють їх застосувати при досліджені впливу структури інших типів феритів на їх магнітні властивості.

Дослідження намагніченості феритних наночасток в умовах зміни температури проводилося в [10]. Магнітні властивості феромагнітних наночасток описуються законом Блоха та задаються показником температури. Показано співпадіння теоретично розрахованих параметрів з результатами експерименту. Проте, питання застосування феритних наночасток в якості ЧЕ теплових СП не розглядувалися. Моделювання застосування повнорозмірних ЧЕ з матеріалу, який складається з феромагнітних наночасток не виконувалося.

В [11] досліджувалися магнітні властивості феромагнитів зі структурою, що складається з однодоменних феритів, суперпарамагнітних феритів в умовах слабкого і сильного магнітного впливу, з урахуванням параметрів намагніченості феромагнитів від зовнішніх магнітних полів та температурного впливу.

Наведено методику визначення рівнянь динаміки та динамічних параметрів ЧЕ теплових СП з феритами різних типів та структури. Але можливість застосування феритів загальної та м'якої структури, марганець-цинкових та на основі кобальту, які мають дуже виражені магнітні властивості, не розглядувалися в представленій праці.

Додатки, що дозволяють виконати математичне моделювання роботи теплового СП з урахуванні типу і принципу роботи ЧЕ та провести параметричні дос-

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

лідження динамічних параметрів ЧЕ та СП представлено в [12]. Розроблені математичні моделі теплових СП з урахуванням структурних характеристик феритних контактів, оброблювалися з застосуванням програм VisSim та Maple. Проте, математичне дослідження моделі теплового СП з застосуванням отриманих рівнянь динаміки у відповідних програмах можливе лише на кінцевому етапі, коли моделювання роботи СП вже виконано з урахуванням особливостей їх роботи.

Отже, невирішеною частиною проблеми покращення ефективності роботи системи раннього виявлення пожежі, є моделювання роботи теплового пожежного сповіщувача з урахуванням магнітних властивостей чутливого елементу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є моделювання роботи теплового сповіщувача з принципом залежності магнітної індукції від температури, для дослідження залежності його динамічних параметрів від характеристик чутливого елемента.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення наступних завдань:

– розробити математичну модель пожежного сповіщувача з урахуванням характеристик чутливого елементу;

– отримати рівняння динаміки сповіщувача та дослідити параметри його роботи.

4. Матеріали та методи досліджень

В якості об’єкту дослідження прийнято залежність магнітних властивостей контактів сповіщувача від зміни температури. Предметом дослідження є моделювання спрацювання сповіщувача для дослідження його динамічних параметрів. У якості гіпотези прийнято припущення про рівномірний прогрів контактів сповіщувача при визначені їх намагніченості.

Структурно-динамічна модель сповіщувача розроблена з використанням програми VisSim [12]. Дослідження намагніченості контактів СП з урахуванням їх структури при зміни температури та параметричні дослідження динамічних параметрів СП виконувалися з застосуванням програми Maple. Дослідження параметрів спрацювання сповіщувача проводилося при визначені постійної часу, динамічної температури спрацювання, інерційності та часу спрацювання для заданої швидкості зміни температури.

5. Розробка математичної моделі сповіщувача

Схема теплового СП з залежністю магнітної індукції від температури (СПТМ-70) має вигляд (рис. 1).

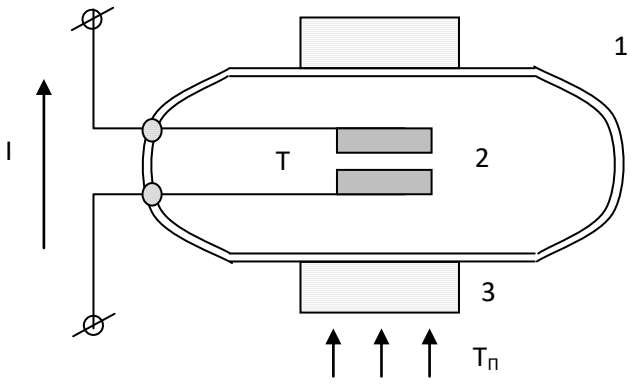


Рис. 1. Розрахункова схема теплового СП з залежністю магнітної індукції від температури: 1 – герметичний контакт; 2 – намагнічені контакти; 3 – магніт

В якості математичної моделі СП приймемо систему рівнянь, що складається з рівняння теплового балансу в умовах нестаціонарного теплообміну з припущенням рівномірного прогріву контактів ЧУ по усій глибині (критерій Біо<0,1):

$$Cm \cdot d\frac{dT}{d\tau} + \alpha FdT = \alpha FdT_{П}, \quad (1)$$

де m – маса контактів, кг; C – теплоємність, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; τ – час, сек; T – поточна температура контактів, К; F – площа, м^2; α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$; $T_П$ – температура оточуючого середовища, К.

Також до системи рівнянь входить залежність магнітних властивостей контактів ЧЕ від температури. Так для м'яких марганець-цинкових (Mn-Zn) феритів, залежність намагніченості від температури [2]:

$$M_{MZ} = M_{SAT}\left[\operatorname{cth}\left(\frac{H}{k_B T}\right) - \frac{k_B T}{H}\right], \quad (2)$$

де M_{SAT} – намагніченість насичення м'якого Mn-Zn фериту, А/м; H – зовнішнє магнітне поле, А/м; k_B – постійна Больцмана, Дж/К.

Для м'яких феритів на основі кобальту [5]

$$M_{Co} = M_{S0} - C\left[e^{\frac{-E_1}{k_B T}} + e^{\frac{-E_2}{k_B T}}\right], \quad (3)$$

де M_{S0} – намагніченість при початковій температурі, А/м; C=M_{S0}/N – постійна що ураховує структуру матеріалу, де N – число Авогадро, моль−1; E_1, E_2 – енергетичні рівні структури фериту.

Для м'яких феритів в умовах високих температур, з урахуванням закону Блоха і температурних властивостей [5]

$$M_{NB} = M_0\left(1 - B_L T^{1,5} + C_{NB} T\right);\ B_L = 2{,}614 V_0\left(\frac{k_B}{4\pi D}\right)^{1,5}, \quad (4)$$

де M_0 – намагніченість при початковій температурі, А/м; B_L – фактор Блоха; B_L – фактор Блоха; V_0 – атомний об'єм феритних наночасток (ФН), м^3; діаметр ФН D, м; C_{NB} – температурний коефіцієнт, 1/К.

Для ФН що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена [5]

$$M_N = \frac{1{,}5\varsigma}{(2\pi JS)^{1,5}}(k_B T)^{1,5} - \frac{1{,}5\varsigma}{\pi JSN} k_B T, \quad (5)$$

де ς – функція Рімана; J, S, N – параметри, що ураховують структуру решітки ФН, м.

Для моделювання залежності намагніченості контактів ЧЕ від температури дорівняємо в рівняннях (2 ÷ 5) диференціали лівої та правої частин:

$$\frac{dM_{MZ}}{dT} = \frac{k_{MZ1}}{\operatorname{sh}^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)}\frac{1}{T^2} + k_{MZ3};\ k_{MZ1} = \frac{M_{SAT} H}{k_B};\ k_{MZ2} = \frac{H}{k_B};\ k_{MZ3} = -M_{SAT}\frac{k_B}{H}; \quad (6)$$

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

$$\frac{dM_{Co}}{dT}=\frac{k_{c1}+k_{c2}}{T^2};k_{c1}=-Ce^{\frac{-E_1}{k_B T}}\cdot\frac{E_1}{k_B};k_{c2}=-Ce^{\frac{-E_2}{k_B T}}\cdot\frac{E_2}{k_B}; \quad (7)$$

$$\frac{dM_{NB}}{dT}=k_{NB1}\sqrt{T}+k_{NB2};\ k_{NB1}=-1{,}5M_0B_L;\ k_{NB2}=M_0C; \quad (8)$$

$$\frac{dM_N}{dT}=k_{N1}\sqrt{T}-k_{N2};\ k_{N1}=\frac{2{,}25\varsigma}{(2\pi JS)^{1,5}}k_B^{\ 1,5};\ k_{N2}=\frac{1{,}5\varsigma}{\pi JSN}k_B. \quad (9)$$

Таким чином, математична модель теплового СП являє собою систему рівнянь (1), (6÷9) та ураховує тепловий баланс контактів ЧЕ, та залежності намагніченості феритових контактів ЧЕ СП від типу та структури контактів ЧЕ при зміні температури.

6. Отримання рівняння динаміки сповіщувача та дослідження параметрів його роботи

Для визначення рівнянь динаміки СП та дослідження параметрів його роботи, підставимо рівняння залежності намагніченості від температури (6÷9) до рівняння теплового балансу (1).

Для м'яких Mn-Zn феритів

$$Cm\cdot\frac{sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}{k_{MZ1}+k_{MZ3}sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}\cdot\frac{d}{d\tau}dM_{MZ}+\alpha F\cdot\frac{sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}{k_{MZ1}+k_{MZ3}sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}\cdot\frac{d}{d\tau}dM_{MZ}=\alpha F\cdot\Delta T_{П};(10)$$

$$T_{MZ}\dot{\overline{m}}+\overline{m}=K_{MZ}\overline{t_{П}}; \quad (11)$$

де

$$T_{MZ}=\frac{Cm}{\alpha F};K_{MZ}=\frac{k_{MZ1}+k_{MZ3}sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}{sh^2\left(\frac{k_{MZ2}}{T}\right)T^2}\frac{T_{П0}}{M_{MZ0}}, \quad (12)$$

де M_{MZ0} – намагніченість м'якого Mn-Zn фериту у вихідній точці, А/м; $T_{П0}$ – температура навколишнього середовища у вихідній точці, К; T_{MZ} – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_{MZ} – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення); $\overline{m}$, $\overline{t_{П}}$ – відносні змінні.

Намагніченість м'якого фериту на основі кобальту

$$Cm\cdot\frac{T^2}{k_{c1}+k_{c2}}\cdot\frac{d}{d\tau}dM_C+\alpha F\cdot\frac{T^2}{k_{c1}+k_{c2}}\cdot dM_C=\alpha F\cdot\Delta T_{П}, \quad (13)$$

$$T_C \dot{\overline{m}} + \overline{m} = K_C \overline{t_П}, \tag{14}$$

де

$$T_C = \frac{Cm}{\alpha F}; K_C = \frac{k_{c1} + k_{c2}}{T^2} \frac{T_{П0}}{M_{C0}}, \tag{15}$$

де M_{C0} – намагніченість м'якого кобальтового фериту у вихідній точці, А/м; T_C – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_C – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

Намагніченість м'яких феритів, що задовольняють закону Блоху і з урахуванням температурного коефіцієнту

$$Cm \cdot \frac{1}{k_{NB1}\sqrt{T} + k_{NB2}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_{NB} + \alpha F \cdot \frac{1}{k_{NB1}\sqrt{T} + k_{NB2}} \cdot dM_{NB} = \alpha F \cdot \Delta T_П; \tag{16}$$

$$T_{NB} \dot{\overline{m}} + \overline{m} = K_{NB} \overline{t_П}; \tag{17}$$

де

$$T_{NB} = \frac{Cm}{\alpha F}; K_{NB} = k_{NB01}\sqrt{T} \frac{T_{П0}}{M_{NB0}}, \tag{18}$$

де M_{NB0} – намагніченість ФН у вихідній точці, А/м; T_{NB} – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_{NB} – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

Намагніченість ФН що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена

$$Cm \cdot \frac{1}{k_{N1}\sqrt{T} - k_{N2}} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_N + \alpha F \cdot \frac{1}{k_{N1}\sqrt{T} - k_{N2}} \cdot dM_N = \alpha F \cdot \Delta T_П; \tag{19}$$

$$T_N \dot{\overline{m}} + \overline{m} = K_N \overline{t_П}, \tag{20}$$

де

$$T_N = \frac{Cm}{\alpha F}; K_N = \left(k_{N1}\sqrt{T} - k_{N2}\right) \frac{T_{П0}}{M_{N0}}, \tag{21}$$

де M_{N0} – намагніченість ФН у вихідній точці, А/м; T_N – динамічний параметр СП (постійна часу), с; K_N – динамічний параметр СП (коефіцієнт посилення).

В результаті отримано рівняння (11, 14, 17, 20) динаміки, що описують роботу теплового СП з принципом дії, що ураховує залежність магнітної індукції при зміні температури навколишнього середовища. Ураховуються матеріал контактів ЧЕ та їх структура. Після отримання параметрів динаміки (12, 15, 18, 21), дослідимо параметри роботи СП використовуючи підхід [11].

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

$$T_{СП} = \frac{60 \cdot \left(T_{ДИН} - T_{СТАТ}\right)}{\frac{dT}{d\tau} \cdot K_{СП}}; \quad (22)$$

$$T_{ДИН} = \frac{60T_{СТАТ} + K_{СП}T_{СП} \cdot \frac{dT}{d\tau}}{60}; \quad (23)$$

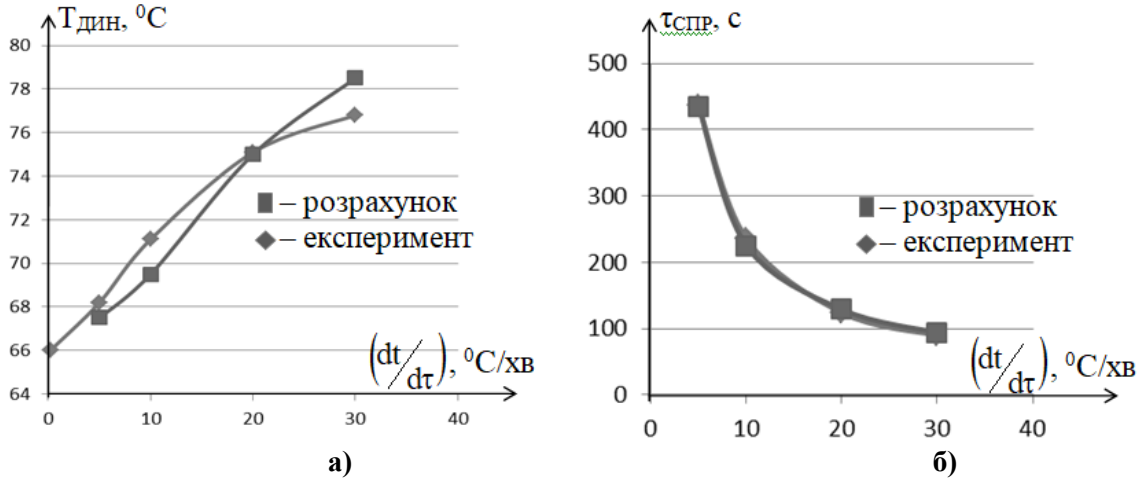
$$\tau_{СПР} = \frac{60 \cdot \left(T_{СТАТ} - T_0\right) + T_{СП}\frac{dT}{d\tau}}{\frac{dT}{d\tau}}, \quad (24)$$

де ТСП – динамічний параметр СП (постійна часу), сек; ТДИН, ТСТАТ – температури спрацьовування СП (динамічна та статична), К; $\tau_{СПР}$ – час спрацьовування, сек; $dT/d\tau$ – швидкість зміни температури, К/сек.

Результати теоретичних розрахунків параметрів роботи СП – динамічної температури та часу спрацювання СП порівняно з експериментальними даними отриманими для СПТМ-70 – динамічної температури, часу спрацювання, інерційності сповіщувача, швидкості зростання температури, показано у табл.1 та на рис. 1.

Табл. 1. Параметри спрацювання СП

$(dT/d\tau)$, ^{0}C/хв	0,2	5	10	20	30
$T_{СТАТ\ ЕКСП}$, ^{0}C	66				
ТДИН ЕКСП, ^{0}C		68,2	71,1	75,1	76,8
ТДИН РОЗР, ^{0}C		67.6	69,7	75,1	78,3
Відносна погрішність $\overline{\Delta x}T_{ДИН}$, %		0,46	3,78	3,14	4,35
τексперимент, с		437	236	124	90
τрозрахунок, с		430	229	129	94
Відносна погрішність $\overline{\Delta x}\tau_{СПР}$, %		1,83	2,97	4,03	4,44
Експеримент, с	24				



а) **б)**

Рис. 1. Параметри роботи теплового СП: а) – динамічна температура спрацювання; б) – час спрацювання

Таким чином отримано рівняння динаміки та проведено дослідження роботи теплового СП, в якому застосовано принцип залежності магнітних властивостей ЧЕ від температури. Форма рівнянь відповідає інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній з постійними коефіцієнтами та відносними змінними. Рівняння динаміки ураховують залежність намагніченості контактів ЧЕ від температури у межах (20÷80) $^{\circ}$C, з урахуванням типу та структури речовини контактів: намагніченість м'якого фериту Mn-Zn (11), намагніченість м'яких феритів на основі кобальту (14), намагніченість м'яких феритів, що відповідають умовам закону Блоху і тепловим властивостям (17), намагніченість ФН, які задовольняють вимогам рівнянь Ейлера-Маклорена (20).

Рівняння динаміки є зручними для дослідження параметрів роботи теплових СП, відносна погрішність складає до 5 %.

7. Обговорення результатів дослідження впливу матеріалу контактів на параметри спрацювання сповіщувача

Створено математичну модель теплового СП з залежністю магнітних властивостей від температури. Особливістю розробленої математичної моделі є урахування впливу матеріалу контактів ЧЕ на параметри спрацювання СП.

Характерною ознакою розробленої моделі СП є урахування властивостей контактної групи ЧЕ, які не досліджувалися раніше: контакти на основі м'яких марганець-цинкових феритів, м'яких феритів на основі кобальту, м'якого фериту з відповідністю умовам закону Блоху і теплових властивостей, феритні наночастки що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена. При порівнянні розробленої моделі СП з відомими моделями сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури, представлена математична модель теплового СП ураховує структуру контактної групи ЧЕ. Так в м'якому марганець-цинковому фериті ураховуються: намагніченість насичення м'якого фериту M_{SAT}, зовнішнє магнітне поле H, постійна Больцмана k_B, поточна температура контактів T, маса контактів m, теплоємність матеріалу контактів C, площа контактів F. Для СП з контактами із м'якого фериту на основі кобальту – намагніченість при початковій температурі M_{S0}, постійна що ураховує структуру матеріалу C, число Авогадро N, енергетичні рівні ячійки фериту E_1 та E_2, постійна Больцмана k_B, поточна температура контактів T, маса контактів m, теплоємність матеріалу контактів C, площа контактів F. Контакти з м'якого фериту що ураховують закон Блоха і температурні властивості – початкова намагніченість MO, фактор (критерій) Блоха BL, атомний об'єм ФН V0, діаметр ФН D, коефіцієнт Больцмана kB, температурний коефіцієнт CNB, поточна температура контактів T, маса контактів m, теплоємність матеріалу контактів C, площа контактів F. Контакти з феритних наночасток що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена – функція Рімана ς, параметри структури решітки наночасток фериту J, S, N, постійна Больцмана k_B, поточна температура контактів T, маса контактів m, теплоємність матеріалу контактів C, площа контактів F.

Отримані рівняння динаміки СП ураховують характеристики матеріалів контактної групи ЧЕ та залежність їх намагніченості від температури і відповідають інерційній позиційній ланці першого порядку, записаній з постійними коефіцієнтами та відносними змінними. Рівняння дозволяють проводити дослідження параметрів роботи СП з залежністю магнітних властивостей від зміни температури оточуючого середовища. Значення відносної погрішності результатів теоретичних розрахунків параметрів роботи СП, відрізняється від значень отриманих в експери-

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

ментах для СПТМ-70 на величину менше 5 %.

Результати розрахунків підтверджують, що намагніченість контактів ЧЕ залежить від комплексного урахування структури речовини контактів і зміни магнітних характеристик контактів ЧЕ від зміни температури. Вказані фактори визначають вплив динамічних властивостей СП на параметри спрацювання.

В якості обмежень використання представлених моделей сповіщувача з залежністю магнітної індукції від температури є виключна можливість їх застосування тільки при визначених початковій намагніченості, рівня магнітного впливу постійного магніту ЧЕ та відомих параметрах структури контактної групи.

Також недоліком розробленої моделі виступає неможливість урахування гармонійної зміни величини магнітного впливу постійного магніту, що розташовано на герконі та зміну магнітного моменту контактної групи ЧЕ при коливанні температури навколишнього середовище в діапазоні понад 80 $^{\circ}$C.

Подальший розвиток наведеного підходу з розробки математичної моделі СП є визначення параметрів намагніченості при початковій температурі, рівня магнітного поля постійного магніту та закону його зміни, визначення магнітного моменту контактів в межах температур, що перевищують прийнятий діапазон. Урахування вказаних параметрів знизить погрішність теоретичних розрахунків, але приведе до значного ускладнення математичної моделі СП за рахунок додавання нелінійних параметрів, лінеаризація яких є окремим складним завданням. В свою чергу, більш загальний підхід в моделюванні роботи СП створює можливість отримати універсальні результати, що спрощує дослідження їх роботи. Проте погрішності отриманих за такими моделями результатів не завжди дозволяють провести якісні дослідження параметрів роботи для СП з контактами ЧЕ різних типів.

Отже, отримані результати застосування розробленої моделі теплового сповіщувача повністю підтвердили справедливість обраної гіпотези, а визначені параметри роботи пожежного сповіщувача співпадають з даними, отриманими в експерименті. Мету дослідження, таким чином, слід вважати досягнутою, а результати виконаних досліджень можна застосувати для формування рекомендацій щодо вибору параметрів динаміки перспективних сповіщувачів. Це дозволяє покращити параметри роботи існуючих сповіщувачів: в першу чергу температури та часу спрацювання.

Таким чином, отримані результати моделювання роботи СП підтверджують правильність обраної гіпотези, а визначені параметри роботи СП співпадають з експериментальними даними. Отже, слід вважати мету роботи досягнутою. Результати проведених досліджень дозволяють надати рекомендації по вибору параметрів роботи СП, що покращить якість їх спрацювання: статичну та динамічну температури спрацювання, інерційність, час спрацювання.

8. Висновки

1. Розроблено математичну модель сповіщувача з залежністю магнітних властивостей від температури. Контакти чутливого елементу в моделях мають структуру м’яких феритів на основах марганець-цинку і кобальту та феритних наночасток з урахуванням вимог закону Блоху і Ейлера-Маклорена. Теоретично визначено та експериментально підтверджено, що при дослідженні магнітних властивостей контактної групи на параметри спрацювання сповіщувача, разом з показниками намагніченості контактів, індукції, магнітного поля постійного магніту і параметрів конвекційного теплообміну з середовищем, математична модель спо-

віщувача повинна ураховувати структуру матеріалу контактів. Так модель намагніченості з м'якими марганець-цинковими феритовими контактами ураховує 7 факторів: намагніченість насичення м'якого фериту, зовнішнє магнітне поле, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу матеріалу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактної групи. Для контактів м'якого фериту на основі кобальту ураховує 10 факторів: намагніченість при початковій температурі, постійну що ураховує структуру матеріалу, число Авогадро, два енергетичні рівні ячійки фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів. Контакти з м'якого фериту по закону Блоха і температурними властивостями ураховує 10 факторів: намагніченість при початковій температурі, фактор Блоха, діаметр наночастки фериту, атомний об'єм феритової наночастки, постійну Больцмана, температурний коефіцієнт, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів. Контакти з феритних наночасток що задовольняють рівнянням Ейлера-Маклорена ураховує 9 факторів: функцію Рімана, три параметри структури решітки наночасток фериту, постійну Больцмана, поточну температуру контактів, масу контактів, теплоємність матеріалу контактів, площу контактів.

2. Отримано рівняння динаміки сповіщувача та досліджено параметри його роботи. Рівняння ураховують тип, структуру речовини контактної групи, залежність магнітних властивостей від температури. Відхилення результатів теоретичних розрахунків від даних експерименту менше 5 %. Рекомендацією для покращення параметрів роботи сповіщувача є доцільність застосовування теплового радіатору та збільшення загальної площі контактної групи для поліпшення умов конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем. Доречне урахування в моделі сповіщувача характеристик початкової намагніченості контактної групи, величини магнітного поля і моменту постійного магніту, розширення діапазону робочих температур, характеристик матеріалу контактів.

Література

1. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A. Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. Vol. 2. P. 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

2. Lu H., Zhu Y., Hui J. G. Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. IEEE Transactions on Magnetics. 2007. Vol. 43(11). P. 3953–3960. doi: 10.1109/TMAG.2007.904942

3. Кахняж М. Л., Салах Я. Л., Шевчик Р. Ю., Беньковски А. В., Коробийчук И. В. Дослідження впливу температури на магнітні характеристики феритів з марганець-цинкового сплава. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Vol. 6(5(78). P. 17–21. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55410

4. Martinson K., Belyak V., Sakhno D., Chebanenko M., Panteleev I. Mn-Zn Ferrite Nanoparticles by Calcining Amorphous Products of Solution Combustion Synthesis: Preparation and Magnetic Behavior. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. 2022. Vol. 31. P. 17–23. doi: 10.3103/S106138622201006X

5. Nairan A.; Khan M.; Khan U.; Iqbal M.; Riaz S.; Naseem S. Temperature-Dependent Magnetic Response of Antiferromagnetic Doping in Cobalt Ferrite Nanostructures. Nanomaterials. 2016. P. 73. doi: 10.3390/nano6040073

6. Thanh T. D., Manh D. H., Phuc N. X. Deviation from Bloch's T3/2 Law and Spin-Glass-Like Behavior in La0.7Ca0.3MnO3 Nanoparticles. J Supercond Nov Magn 28. 2015. P. 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5

 © В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

7. Samir Ullah, Firoz U., Momin A., Hakim M. Effect of V2O5 addition on the structural and magnetic properties of Ni–Co–Zn ferrites. Published by IOP Publishing Ltd. 2021. doi:10.1088/2053-1591/abd865

8. Mahmoudi M., Kavanlouei M. Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO_2 additivet. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2015. Vol. 384. P. 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053

9. Jackiewicz D., Szewczyk R., Salach J. Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on constructional steels. Solid State Phenomena. 2013. Vol. 199. P. 466–471. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.466

10. Cojocaru S. Magnon gas and deviation from the Bloch law in a nanoscale Heisenberg ferromagnet. Philosophical Magazine. 2011. P. 1–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/233077658_Magnon_gas_and_deviation_from_the_Bloch_law_in_a_nanoscale_Heisenberg_ferromagnet

11. Дурєєв В. О., Христич В. В., Бондаренко С. М., Маляров М. В., Корнієнко Р. В. Математична модель магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 31–43. URL: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/37/3.pdf ISSN 2524-0226

12. 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*
V. Khrystych, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
S. Bondarenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Antoshkin, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
M. Maliarov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE MAGNETO-CONTACT THERMAL FIRE ALARM

Mathematical models of a fire detector have been developed taking into account the dependence of the magnetization of the contacts of the sensitive element on the temperature and the parameters of the contact material. The obtained equations of the dynamics of the SP take into account the type and structure of the materials of the contact elements of the ЧЭ and the dependence of their magnetization on the temperature and correspond to the inertial positional link of the first order, written in relative variables with constant coefficients. As a result of studying the current literature, the characteristics of the material of the magnetic contacts have been taken into account in the models to determine its optimal dynamic parameters. The mathematical model of the detector is a system of equations consisting of the heat balance equation under conditions of non-stationary heat exchange with the assumption of uniform heating of the contacts of the sensitive element over the entire depth. The second is the equation of the relationship between the magnetization of contacts soldered in a reed switch and temperature. The obtained detector dynamics equations take into account the type and structure of the materials of the contact elements and the dependence of their magnetization on temperature and correspond to the inertial positional link of the first order. The variables of the equations are relative to the linearization point, with constant coefficients. The equations allow to study the detector operation parameters with the principle of the dependence of magnetic induction on temperature. The dynamics equations allow to study the dynamic parameters of the operation of thermal fire detectors, the relative error of the results does not exceed 5 %. The obtained results of the simulation of the fire detector operation confirm the correctness of the chosen hypothesis, and the determined parameters of the fire detector operation coincide with the experimental data. The results of the conducted studies allow to provide recommendations on the selection of the detector operation parameters, which will improve the

quality of their operation: static and dynamic operation temperatures, inertia, operation time.

Keywords: fire detector, sensitive element, mathematical model, inertia, activation time, activation temperature

References

1. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A. (2018). Model of thermal effect of fire within a dike on the oil tank. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2, 95–100. doi: 10.29202/nvngu/2018-2/12

2. Lu, H., Zhu, Y., Hui, J. G. (2007). Measurement and modeling of thermal effects on magnetic hysteresis of soft ferrites. IEEE Transactions on Magnetics, 43(11), 3953–3960. doi: 10.1109/tmag.2007.904942

3. Kachniarz, M., Salach, J, Szewczyk, R., Bieńkowski, A., Korobiichuk, I. (2015). Investigation of temperature effect on magnetic characteristics of manganese-zinc ferrites. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/5(78), 17–21. doi: 10.15587/1729-4061.2015.55410

4. Martinson, K., Belyak, V., Sakhno, D., Chebanenko, M., Panteleev, I. (2022). Mn-Zn Ferrite Nanoparticles by Calcining Amorphous Products of Solution Combustion Synthesis: Preparation and Magnetic Behavior. International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, 31, 17–23. doi: 10.3103/S106138622201006X

5. Nairan, A., Khan, M., Khan, U., Iqbal, M., Riaz, S., Naseem, S. (2016). Temperature-Dependent Magnetic Response of Antiferromagnetic Doping in Cobalt Ferrite Nanostructures. Nanomaterials, 73. doi: 10.3390/nano6040073

6. Thanh, T. D., Manh, D. H., Phuc, N. X. (2015). Deviation from Bloch's T3/2 Law and Spin-Glass-Like Behavior in La0.7Ca0.3MnO3 Nanoparticles. J Supercond Nov Magn 28, 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5

7. Samir, U., Firoz, U., Momin, A., Hakim, M. (2021). Effect of V2O5 addition on the structural and magnetic properties of Ni–Co–Zn ferrites. Published by IOP Publishing Ltd. doi: 10.1088/2053-1591/abd865

8. Mahmoudi, M., Kavanlouei, M. (2015). Temperature and frequency dependence of electromagnetic properties of sintering Li–Zn ferrites with nano SiO_2 additivet. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 384, 276–283. doi: 10.1016/j.jmmm.2015.02.053

9. Jackiewicz, D., Szewczyk, R., Salach, J. (2013). Modelling the magnetic characteristics and temperature influence on constructional steels. Solid State Phenomena, 199, 466–471. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.199.466

10. Cojocaru, S. (2011). Magnon gas and deviation from the Bloch law in a nanoscale Heisenberg ferromagnet. Philosophical Magazine, 1–15. Available at: https://www.researchgate.net/publication/233077658_Magnon_gas_and_deviation_from_the_Bloch_law_in_a_nanoscale_Heisenberg_ferromagnet

11. Durieiev, V. O., Khrystych, V. V., Bondarenko, S. M., Maliarov, M. V., Korniienko, R. V. (2023). Matematychna model mahnitnokontaktnoho teplovoho pozhezhnoho spovishchuvacha. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 1(37), 31–43. Available at: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/37/3.pdf ISSN 2524-0226

12. 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: 11.10.2024
Прийнята до друку: 12.11.2024

© В. О. Дурєєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, О. А. Антошкін та ін.

УДК 624.012.4

Н. П. Заїка, *ад'юнкт (ORCID 0000-0002-8757-5709)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ СТАЛЕВОЇ БАЛКИ З ВОГНЕЗАХИСТОМ З ГІПСОКАРТОНУ ВІД ЧАСУ ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

Досліджено розподіл температури в сталевих балках з профілю НЕВ 200 з вогнезахистом у вигляді гіпсокартонних плит під впливом стандартного температурного режиму пожежі. Розрахунок проведено у програмному комплексі ANSYS WB для визначення залежності температури в сталевій конструкції від часу впливу пожежі. Модель дозволяє детально оцінити теплопередачу у матеріалах із різними теплофізичними характеристиками, зокрема змінною теплоємністю та теплопровідністю сталі й гіпсокартону. Використання гіпсокартону як вогнезахисного покриття обґрунтовано його здатністю уповільнювати нагрівання сталі. Такий підхід дозволяє значно підвищити вогнестійкість сталевих конструкцій, зберігаючи їхню механічну цілісність. Отримані результати показали, що максимальна температура в сталевій балці з гіпсокартонним вогнезахистом не перевищує 443 °С навіть при тривалості пожежного впливу у 60 хв, що припускає відповідність до класу вогнестійкості R60. Побудований графік залежності максимальної температури від часу впливу пожежі підтвердив ефективність вогнезахисту гіпсокартоном і високу точність апроксимації моделі (коефіцієнт детермінації R^2=0,9923), що свідчить про достовірність результатів. Запропонована модель та підхід можуть бути використані для оцінки вогнестійкості інших сталевих елементів конструкцій, зокрема для підбору оптимальних вогнезахисних матеріалів. Дослідження є актуальним у контексті розробки економічно вигідних і ефективних методів захисту будівельних конструкцій від впливу високих температур пожежі. Методика моделювання вогнезахисту в сталевих балках надає можливість визначення температурних режимів, що виникають у реальних умовах пожежі, та розробки рекомендацій щодо підвищення вогнестійкості сталевих конструкцій, особливо в сучасних будівлях, де важлива оптимізація матеріальних і ресурсних витрат.

Ключові слова: моделювання, стандартний температурний режим пожежі, питома теплоємність, теплопровідність, вогнезахист, гіпсокартон

1. Вступ

Сталеві будівельні конструкції відіграють ключову роль у сучасному будівництві, забезпечуючи високу міцність, гнучкість та стійкість до різноманітних навантажень. Завдяки своїм фізичним властивостям, сталеві матеріали дозволяють створювати легкі та витривалі конструкції, що є особливо важливими в умовах зростаючих вимог до енергоефективності та екологічності будівель.

Крім того, сталеві конструкції демонструють високу швидкість монтажу, що знижує витрати на будівництво та скорочує терміни реалізації проєктів. Інноваційні технології, такі як модульне будівництво, ще більше підвищують ефективність використання сталевих елементів, дозволяючи оптимізувати процеси проектування та виготовлення.

Слід зауважити, що сталеві будівельні конструкції характеризуються тривалим терміном експлуатації що робить їх привабливими для комерційних, промислових та житлових проектів. Однак вогнестійкість незахищених сталевих будівельних конструкцій при набутті критичної температури 700 ºС майже втрачається, що загрожує здоров'ю та життю людей навіть на початкових стадіях пожежі. Таким чином, проведення досліджень щодо підвищення рівня вогнестійкості відповідальних конструктивних елементів, таких як сталеві балки є актуальним.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішенням цієї проблеми займалось багато дослідників. Так, наприклад, у

роботі [1] запропоновано підвищення вогнестійкості сталевої балки за допомогою вогнезахисного облицювання у вигляді мінераловати, однак такий вид облицювання може втрачати свою цілісність при високих температурах, що зменшує вогнестійкість конструкції. Крім того, мінеральна вата може втрачати форму або відшаровуватися під час пожежі, що також призводить до зниження вогнезахисної здатності сталевих конструкцій. У роботах [2, 3] описано використання вогнезахисної фанери як вогнезахисного способу облицювання для дерев'яних балок. Проведені дослідження у [2, 3] вказують на ефективність запропонованого способу вогнезахисту. Але при цьому виникає складність застосування такого виду вогнезахисту для сталевих балок під час технологічного процесу виготовлення вказаних листів вогнезахисної фанери. Крім того, визначення необхідного шару такого вогнезахисту для досягнення необхідного класу вогнестійкості для сталевих балок під час проведення моделювання потребує проведення додаткових досліджень з розв'язанням обернених теплових задач щодо визначення теплофізичних характеристик просоченої вогнезахисної фанери.

Під час досліджень із застосуванням математичного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі на будівельні конструкції використовуються різні програмні комплекси. Важливим критерієм вибору програмного продукту для розрахунків є простота його використання. Так, наприклад, у [4] використовується програмне забезпечення SAFIR для розв'язання теплотехнічних задач. Цей програмний продукт, розроблений для чітко визначеної сфери застосування, є відносно простим у використанні. Однак у ньому виникають труднощі з моделюванням вогнезахищених конструкцій, зокрема, із правильним та точним задаванням параметрів вогнезахисних покриттів. Це обмеження робить SAFIR менш придатним для досліджень температурного розподілу у сталевих балках із вогнезахистом.

У [5] було розв'язано теплотехнічну задачу розподілу температури сталевої балки із вогнезахистом за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Однак під час завдання теплофізичних параметрів вогнезахисного матеріалу в [5] було прийнято постійне значення питомої теплоємності, що дорівнює 70,4 Дж/кг·°С, без урахування температурної залежності цього показника. Такий підхід не забезпечує достатньої точності розрахунків, оскільки теплоємність є важливим параметром, який значно впливає на розподіл температури в будь-яких конструкціях під час впливу пожежі.

Складнощі при моделюванні теплового впливу на сталеві конструкції з вогнезахистом виникають під час створення математичних моделей матеріалів, зокрема при визначенні теплофізичних характеристик вогнезахисних матеріалів, які необхідно задавати у їх властивостях. У [6, 7] детально описана методика розрахунку теплотехнічної задачі із зазначенням теплофізичних характеристик сталевих конструкцій. Проте, зважаючи на те, що сталеві конструкції серед кам'яних і дерев'яних мають найнижчу вогнестійкість і у 99,9 % випадків потребують вогнезахисту, у [6, 7] не наведено жодного вогнезахисного матеріалу із відповідними теплофізичними параметрами. Пасивні вогнезахисні матеріали, такі як штукатурки на основі цементу, глини та інших мінеральних сполук, а також вироби з мінеральних волокон, використовуються для захисту сталевих конструкцій від впливу високих температур [8, 9]. Ці матеріали відрізняються низькою вартістю нанесення та є економічно вигідними, хоча їх застосування обмежується певними типами складних форм та елементів, що поступаються в універсальності плитним систе-

© Н. П. Заїка

мам [8, 9]. Основні недоліки полягають у тому, що такі матеріали не забезпечують естетичного вигляду, потребують нанесення у вологому стані та додаткового часу на висихання, що може затримати виконання інших робіт на об'єкті.

Тому було прийнято рішення використовувати у вигляді вогнезахисту сталевої балки гіпсокартонні плити, які виготовляються з вогнестійкого матеріалу, що містить воду у формі кристалічно зв'язаного гіпсу. Під час нагрівання ця вода випаровується, що поглинає тепло і допомагає затримувати підвищення температури на початкових етапах пожежі. Крім того, гіпсокартонні плити легко встановлюється і можуть бути закріплені на сталевих балках без потреби в складних конструкціях або спеціальних інструментах. На відміну від інших матеріалів, таких як бетон чи цегла, гіпсокартон легкий і не створює великого додаткового навантаження на конструкцію. Він також добре піддається обробці, що дозволяє адаптуватися до різних форм та розмірів балок. У порівнянні з багатьма іншими методами вогнезахисту, гіпсокартон є відносно недорогим рішенням, особливо якщо його можна використовувати разом з іншими захисними матеріалами.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є створення математичної моделі розподілу температури сталевої балки з вогнезахистом із гіпсокартону в умовах пожежі, яка б враховувала вплив температурно-залежних теплофізичних характеристик вогнезахисного матеріалу.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи полягає у визначенні закономірностей розподілу температури у сталевій балці з двотаврового європейського профілю HEB 200 із вогнезахистом в залежності від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі. Це дозволить проводити оцінювання з вогнестійкості таких конструкцій із використанням вогнезахисту з плит гіпсокартону товщиною 20 мм.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Створити розрахункову модель у програмному комплексі ANSYS WB для проведення розрахунку розподілу температури у фрагменту сталевій балки з двотаврового європейського профілю HEB 200 із влаштуванням вогнезахисту із гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

2. За результатами проведеного розрахунку проаналізувати розподіл температури безпосередньо у фрагменті сталевій балки з двотаврового європейського профілю HEB 200 та встановити залежність розподілу максимальної температури по цій конструкцій від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є сталеві балки двотаврового європейського профілю HEB 200 з вогнезахистом з гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Предмет дослідження – закономірності розподілу температури у сталевих балках з вогнезахистом з гіпсокартону під час моделювання пожежі залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі.

Гіпотеза дослідження полягає у використанні гіпсокартонних плит для сталевих двотаврових балок як вогнезахисного покриття, що дозволяє знизити температуру таких будівельних конструкцій під час пожежі та сприяє підвищенню їхньої вогнестійкості.

Методи дослідження включали три основні етапи:

1) Розробка математичної моделі у програмному комплексі ANSYS WB для проведення обчислень впливу стандартного температурного режиму пожежі на фрагмент сталевої балки із вогнезахистом з гіпсокартону протягом 60 хв.

2) Аналіз розподілу температури по фрагменту сталевої балки із вогнезахистом з гіпсокартону в умовах впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв..

3) Встановлення залежності температурного розподілу по фрагменту сталевій балки із вогнезахистом з гіпсокартону від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі (15 хв, 30 хв, 45 хв та 60 хв) для оцінки ефективності вогнезахисту.

Для проведення досліджень було обрано сталеву балку з двотаврового європейського профілю НЕВ 200. Такий профіль було обрано, оскільки такий тип конструкцій часто вибирається для балок через їх універсальні розміри та міцнісні характеристики. Несуча здатність**:** НЕВ 200 забезпечує хорошу міцність при помірній вазі, що підходить для багатьох конструкційних задач. Його розміри дозволяють витримувати значні навантаження без необхідності обирати більші профілі. Цей тип профілю має широку сферу застосування – від балок перекриття в будівлях до колон і каркасів. Його висота та товщина стінки підходять для багатьох типів споруд. Вага та розміри НЕВ 200 полегшують монтаж і транспортування, що знижує трудовитрати та підвищує економічність у порівнянні з більшими або важчими профілями. НЕВ 200 є стандартним типорозміром, тому він широко доступний на ринку. Його часте використання також робить його доступним за ціною. Це поєднання технічних та економічних факторів робить НЕВ 200 оптимальним вибором для багатьох будівельних і інженерних задач, саме тому було вирішено використовувати для досліджень саме цю сталеву балку з двотаврового європейського профілю НЕВ 200. Розміри перерізу досліджуваної конструкції наведені у табл. 1.

Табл. 1. Розміри сталевої двотаврової балки НЕВ 200

Тип НЕВ	Висота (h), мм	Ширина полиці (b), мм	Товщина стінки (t_w), мм	Товщина полиці (t_f), мм
200	200	200	9	15

Для проведення моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі було обрано програмне забезпечення ANSYS WB, оскільки цей програмний комплекс надає змогу точно моделювати властивості матеріалів, у тому числі змінні характеристики вогнезахисних матеріалів, які можуть змінюватися в залежності від температури. Це дозволяє більш точно врахувати вплив вогнезахисту на розподіл температури в сталевій балці. Крім цього, цей програмний продукт дозволяє враховувати складні умови теплопередачі конвективного та радіаційного теплообміну, що важливо для адекватного моделювання умов пожежі. Також можна налаштувати точні граничні умови, такі як теплові потоки та теплові втрати [10].

На основі позитивних результатів попередніх досліджень [11, 12], для зменшення розрахункової області та підвищення продуктивності обчислень було вирішено використовувати окремий фрагмент сталевої балки з гіпсокартоном товщиною 5 мм. Це рішення дозволяє розглядати лише частину конструкції, що показано на рис. 1.Товщина гіпсокартонних плит прийнята 20 мм (рис. 1).

© Н. П. Заїка

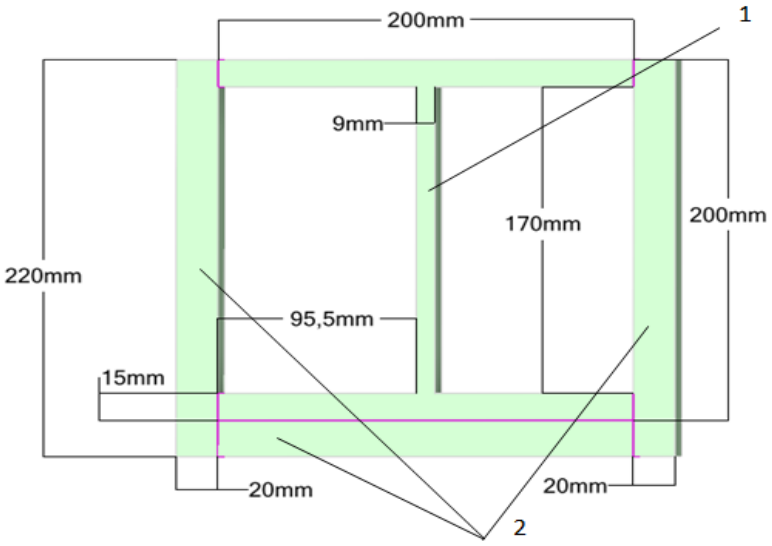


Рис. 1. Конструктивна схема перерізу фрагменту сталевої двотаврової балки з вогнезахистом із гіпсокартону: 1 – сталевий двотавровий профіль НЕВ 200, 2 – плити гіпсокартону

Для проведення досліджень впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку НЕВ 200 було змодульовано 2 матеріали, сталь та гіпсокартон. Теплофізичні властивості сталі прийнято за рекомендаціями [6, 7]. Теплофізичні характеристики гіпсокартону прийнято за рекомендаціями [13] та представлені у табл. 2, 3.

Табл. 2. Коефіцієнт теплопровідності в залежності від температури.

Температура Θ,^{0}C	5	100	220	500	800	1100
Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт×м$^{-1}$×^{o}C^{-1}	0,1	0,596	1,35	0,05	0,248	5,428

Табл. 3. Коефіцієнт питомої об'ємної теплоємності в залежності від температури.

Температура Θ,^{0}C	5	95	100	120	125	1100
Питома об'ємна теплоємність c_V, Дж×м$^{-3}$× ^{o}C^{-1}	$2{,}16\times10^4$	$2{,}66\times10^6$	$3{,}23\times10^7$	$3{,}23\times10^7$	$1{,}07\times10^6$	1×10^4

Густина гіпсокартону прийнята 700 кг/м^3, сталі 7850 кг/м^3 відповідно.

Скінченно-елементна модель побудована за допомогою гексаедральних скінченних елементів типу SOLID, їхня загальна кількість складає 25800 одиниць, скінченно-елементна схема відображена на рис. 2.

Прикладання граничних умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку з вогнезахистом із гіпсокартону прийнято трьохстороннім за рекомендаціями [6, 7] та відображено на рис. 3.

Тепловий вплив від стандартного температурного режиму пожежі прийнятий терміном у 60 хв та за рекомендаціями [6, 7], який визначається залежністю:

$$\Theta_s = 345\lg(8t+1)+20\,, \qquad (1)$$

де t – час, що відраховується від початку випробування, хв.; Θ_s – температура, яка відповідає часу t, °C.

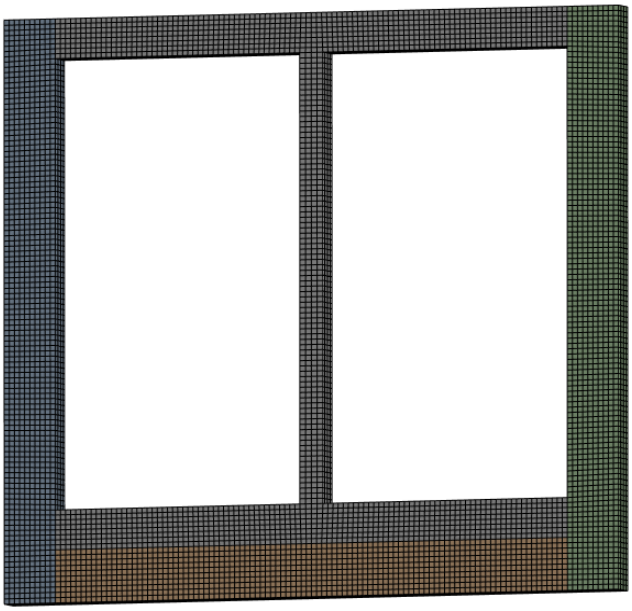


Рис. 2. Скінченно-елементна схема сталевої балки з вогнезахистом із гіпсокартону

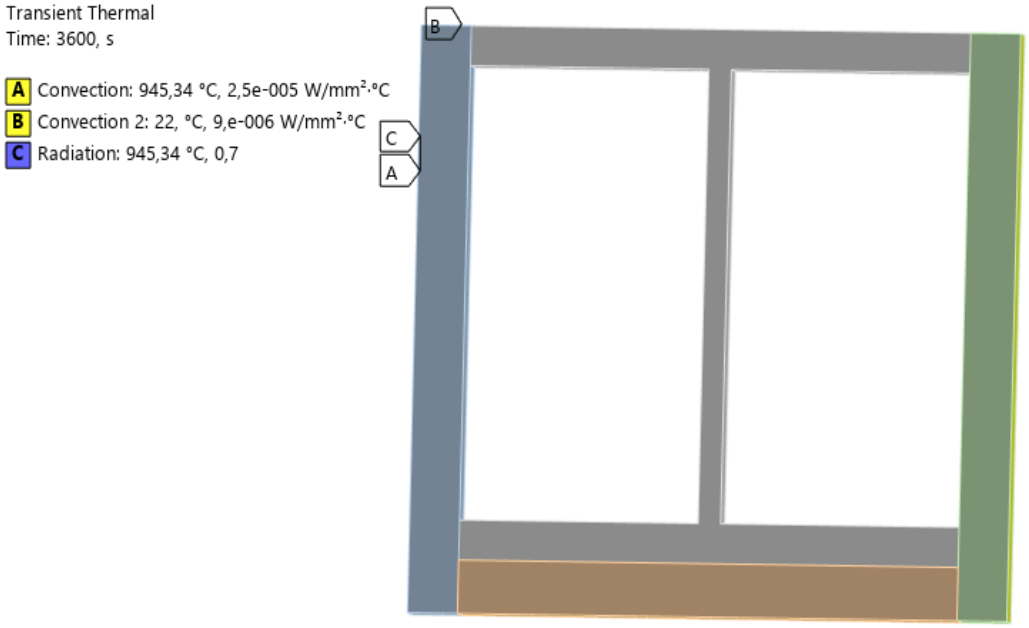


Рис. 3. Прикладання граничних умов впливу стандартного температурного режиму пожежі на сталеву балку з вогнезахистом із гіпсокартону

Термін впливу стандартного температурного режиму пожежі було прийнято 60 хв, оскільки балки з класом вогнестійкості R60 відповідають найвищому I ступеню вогнестійкості будівлі.

5. Результати моделювання впливу пожежі на сталеву балку з вогнезахистом

5.1. Результати розв'язання теплотехнічної задачі

Математичне моделювання проводилось у модулі Transient Thermal програмного комплексу ANSYS WB. Результати розподілу температури в різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі по фрагменту сталевої балки з профілю HEB 200 із вогнезахистом з гіпсокартону представлені на рис. 4.

© Н. П. Заїка

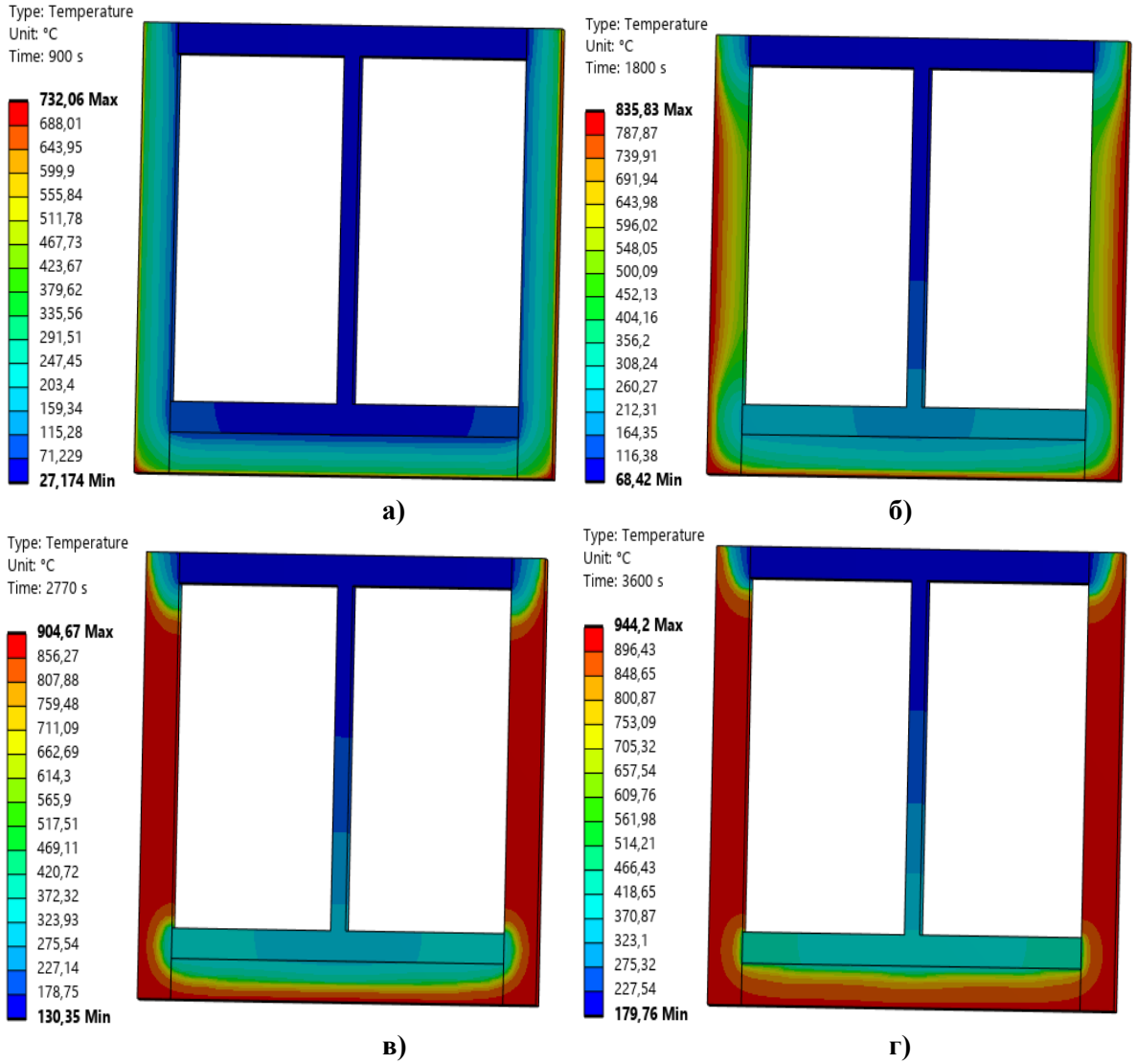


Рис. 4. Візуалізація результатів розподілу температури по фрагменту сталевої балки з профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з гіпсокартону у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 15 хв, б – 30 хв, в – 45 хв, г – 60 хв

Для визначення залежності розподілу температури по балці від тривалості впливу стандартного температурного режиму пожежі (із застосуванням вогнезахисту з гіпсокартону) на рис. 5 показано температурний розподіл безпосередньо в сталевій балці, без візуалізації гіпсокартону.

На рис. 6 відображений графік розподілу мінімальної, середньої та максимальної температури безпосередньо по фрагменту сталевої балки з профілю НЕВ 200 протягом 60 хв.

Максимальна температура в перерізі сталевої балки складає на 15 хв – 81,616 °С, на 30 хв – 243,76 °С, на 45 хв – 339,62 °С та на 60 хв – 442,33 °С.

5.2. Визначення залежності розподілу температури в балці від часу впливу пожежі

За результатами проведених обчислювальних експериментів розподілу температури при теплового впливу пожежі протягом 60 хв безпосередньо по фрагменту сталевої балки з профілю НЕВ 200 з гіпсокартоном, встановлена залежність розподілу максимальної температури в конструкції від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі, яка відображена на рис. 5.

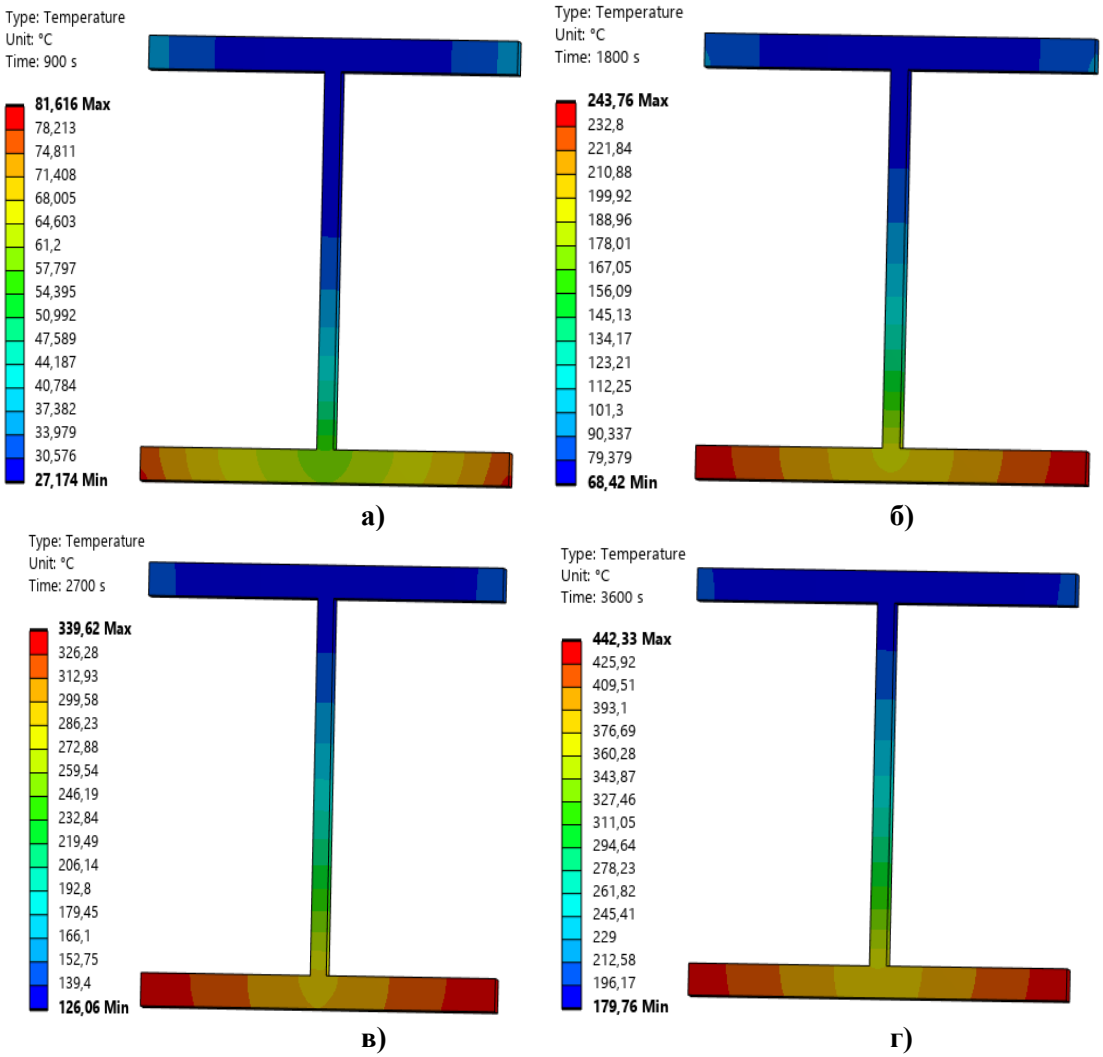


Рис. 5. Візуалізація результатів розподілу температури при впливі стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв безпосередньо по фрагменту сталевої балки з профілю НЕВ 200 (без візуалізації гіпсокартону)

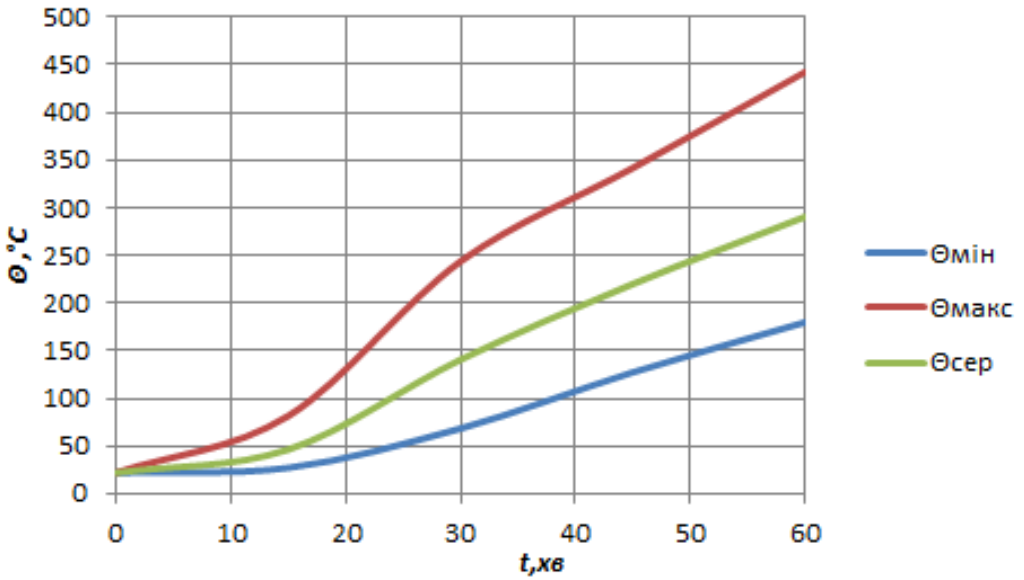


Рис. 6. Графік розподілу мінімальної, середньої та максимальної температур по безпосередньо фрагменту сталевої балки при впливі стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв

© Н. П. Заїка

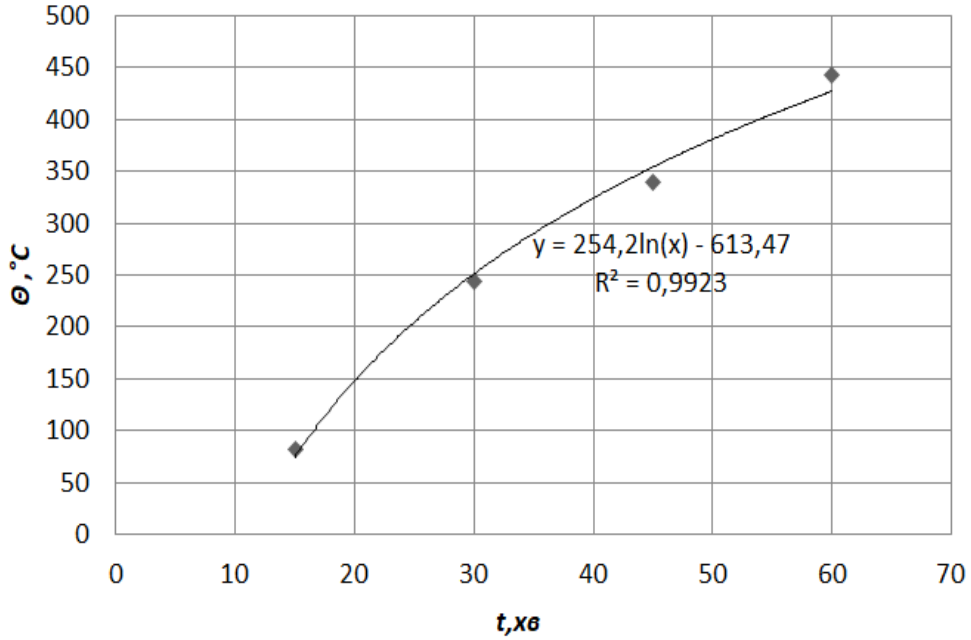


Рис. 6. Графік залежності розподілу максимальної температури в сталевій балці із вогнезахистом з гіпсокартону від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі

Залежність на графіку (рис. 6) показує зміну максимальної температури у перерізі сталевої балки з вогнезахистом із гіпсокартону залежно від часу впливу стандартного температурного режиму пожежі протягом 60 хв, що можна описати у вигляді: $\Theta_{макс} = 254{,}2\ln(x) - 613{,}47$.

6. Обговорення результатів розподілу температури при впливі стандартного температурного режиму

Аналіз максимальних температур у сталевій балці профілю НЕВ 200 із захисним шаром гіпсокартону показав, що температура в профілі не перевищує 443 °С (рис. 4, 5). Згідно з даними табл. 4.1 [7], критична температура для сталевих профілів при рівні використання конструкції 80 % становить не менше 496 °С. Отримані результати розподілу температури в сталевій балці пояснюються високою теплоємністю гіпсокартону, який містить кристалічно зв'язану воду. Під час нагрівання ця вода випаровується, поглинаючи значну кількість тепла, що уповільнює нагрівання сталевої балки, тим самим підвищуючи її вогнестійкість. Крім того, врахування змінних теплофізичних характеристик матеріалів дозволило здійснити моделювання реальних умов теплового впливу пожежі.

Особливістю запропонованого методу вогнезахисту є використання гіпсокартону як економічно вигідного та ефективного матеріалу. Відмінність отриманих результатів полягає у врахуванні температурної залежності теплоємності, що значно підвищує точність прогнозування температурного розподілу у сталевій балці з вогнезахистом. Це забезпечує можливість використання отриманих даних для оцінки вогнестійкості таких конструкцій.

При цьому існують обмеження під час проведення досліджень, зокрема моделювання здійснювалося лише за стандартним температурним режимом пожежі. Такий підхід є суворим і не враховує реальних умов пожежі, зокрема фази затухання та нерівномірного нагрівання.

Недоліком проведених досліджень є спрощення геометрії моделі балки, що

унеможливлює розв'язання статичної задачі для цієї моделі. Для аналізу напружено-деформованого стану конструкції необхідно враховувати реальні умови закріплення та довжину прольоту балки.

Подальший розвиток досліджень може включати аналіз сталевих балок з гіпсокартонним вогнезахистом в умовах нерівномірного нагрівання, механічного навантаження та реальних пожежних режимів, що дозволить отримати ще більш точні дані для проектування безпечних конструкцій. Однак це може призвести до суттєвого збільшення розрахункової області, що потребує відповідного збільшення обчислювального ресурсу.

7. Висновки

1. Проведене моделювання розподілу температури у сталевій балці профілю НЕВ 200 із вогнезахистом з гіпсокартону продемонструвало ефективність застосування цього матеріалу як захисного шару. Використання гіпсокартонних плит дозволяє значно знизити максимальну температуру в сталевому профілі під впливом пожежного навантаження. Максимальна температура в сталевій балці, яка не перевищує 443 °С навіть після 60 хв впливу пожежі, свідчить про відповідність конструкції класу вогнестійкості R60. Це підтверджує доцільність застосування гіпсокартону для забезпечення пожежної безпеки сталевих конструкцій.

2. За результатами проведених досліджень отримана логарифмічна залежність максимальної температури у перерізі сталевої балки з вогнезахистом залежно від часу впливу пожежі має вигляд: $\Theta_{макс} = 254{,}2\ln(x) - 613{,}47$. Висока точність апроксимації (коефіцієнт детермінації R^2=0,9923) свідчить про адекватність моделі для прогнозування температурного розподілу в умовах пожежного впливу. Ця залежність може бути використана для оцінки вогнестійкості сталевих конструкцій з різним рівнем навантаження.

Література

1. Борсук О., Нуянзін О., Кришталь В., Ведула С., Горовенко М. Дослідження межі вогнестійкості сталевої балки за умови втрати цілісності вогнезахисного покриття. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2020. Вип. № 4(2). С. 5–15. URL: https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/62

2. Pozdieiev S., Zmaha M., Nedilko I., Zmaha Y. Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation». 2020. Vol. 4(2). P. 97–105. doi: 10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105

3. Zmaha M. Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation». 2021. Vol. 5(2). P. 125–135. doi: 10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135

4. Franssen J., Gernay T. Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. Journal of Structural Fire Engineering. 2017. Vol. 8(3). P. 300–323. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010

5. Ковальов А., Пурденко Р., Отрош Ю., Томенко В., Качкар Є., Майборо-

© Н. П. Заїка

да Р. Оцінювання вогнестійкості вогнезахищених сталевих балок. ВІСТІ. 2022. Вип. № 2(51). С. 43–53. doi: 10.31474/1999-981X-2022-2-43-53

6. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). [Чинний від 01.03.2013]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва, 2013. 150 с.

7. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-2:2010 Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-2. Загальні положення. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Чинний від 01.03.2013]. Міністерство регіонального розвитку та будівництва, 2013. 98 с.

8. Новак С., Дріжд В., Добростан О. Оцінювання вогнезахисних властивостей покриттів і облицювань для сталевих конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2021. Вип. № 2(12). С. 43–53. doi: 10.33269/nvcz.2021.2(12).43-53

9. Buchanan A. Structural design for fire safety. Corus Construction and Industrial. Fire resistance of steel-framed buildings, North Lincolnshire, 2001. 221 p.

10. Pallares-Muñoz M., Paya-Zaforteza I., Hospitaler A. New methodology using beam elements for the analysis of steel frames subjected to non-uniform temperatures due to fires, Structures. 2021. Vol. 31. P. 462–483. doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.008

11. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4(7(130)). P. 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

12. Sidnei S. O., Nuianzin O. M., Kostenko T. V., Berezovskyi A. I., Wąsik W. A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. Journal of Engineering Sciences, Ukraine. 2023. Vol. 10(2). P. D1–D7. doi: 10.21272/jes.2023.10(2).d1

13. Довбиш А. В. Обґрунтування умов застосування гіпсокартонних плит як вогнезахисних оздоблювальних матеріалів будівельних конструкцій: дис. канд. техн. наук: 21.06.02. Український НДІ пожежної безпеки. Київ, 2006. 204 с.

14. Сідней С. О. Дослідження впливу скінченно-елементної сітки на розподіл температури по порожнистій плиті під час моделювання пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2024. Вип. № 1(17). С. 93–102. doi: 10.33269/nvcz.2024.1(17).93-103

N. Zaika, Adjunct
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

TEMPERATURE DISTRIBUTION PATTERNS OF A STEEL BEAM WITH FIRE PROTECTION FROM GYPSUM BOARD DURING FIRE

The article examines the temperature distribution in steel beams from the HEB 200 profile with fire protection in the form of plasterboard plates under the influence of the standard fire temperature regime. The calculation was carried out in the ANSYS WB software package to determine the dependence of the temperature in the steel structure on the time of exposure to fire. The model allows for a detailed assessment of heat transfer in materials with different thermophysical characteristics, in particular, variable heat capacity and thermal conductivity of steel and plasterboard. The use of plasterboard as a fire-resistant coating is justified by its ability to slow down the heating of steel. This approach makes it possible to significantly increase the fire resistance of steel structures while maintaining their me-

chanical integrity. The obtained results showed that the maximum temperature in a steel beam with plasterboard fire protection does not exceed 443 °C even with a duration of fire exposure of 60 minutes, which assumes compliance with the fire resistance class R60. The constructed graph of the dependence of the maximum temperature on the time of exposure to fire confirmed the effectiveness of fire protection with plasterboard and the high accuracy of the approximation of the model (the coefficient of determination R^2=0.9923), which indicates the reliability of the results. The proposed model and approach can be used to assess the fire resistance of other steel structural elements, in particular, to select optimal fire-resistant materials. The research is relevant in the context of the development of cost-effective and effective methods of protecting building structures from the effects of high fire temperatures. The method of modeling fire protection in steel beams provides an opportunity to determine the temperature regimes that occur in real fire conditions, and to develop recommendations for increasing the fire resistance of steel structures, especially in modern buildings, where the optimization of material and resource costs is important.

Keywords: modeling, standard fire temperature regime, specific heat capacity, thermal conductivity, fire protection, plasterboard

References

1. Borsuk, O., Nuyanzin, O., Kryshtal, V., Vedula, S., Horovenko, M. (2020). Study of the limit of fire resistance of a steel beam under the condition of loss of integrity of the fire-resistant coating. Emergency situations: prevention and elimination, 4(2), 5–15. Available at: https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/62

2. Pozdieiev, S., Zmaha, M., Nedilko, I., Zmaha, Y. (2020). Methods of mathematical modeling of the area carbonation of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation», 4(2), 97–105. doi: 10.31731/2524-2636.2020.4.2.-97-105

3. Zmaha, M. (2021). Analysis of research methods for determining the fire of wooden beams with lining of fire protective plywood. Collection of Scientific Papers of Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine «Emergency Situations: Prevention and Liquidation», 5(2), 125–135. doi: 10.31731/2524.2636.2021.5.2.-125-135

4. Franssen, J., Gernay, T. (2017). Modeling structures in fire with SAFIR®: Theoretical background and capabilities. Journal of Structural Fire Engineering, 8(3), 300–323. doi: 10.1108/JSFE-07-2016-0010

5. Kovalev, A., Purdenko, R., Otrosh, Yu., Tomenko, V., Kachkar, E., Maiboroda, R. (2022). Evaluation of fire resistance of fire-resistant steel beams. NEWS of the Donetsk Mining Institute, 2(51), 43–53. doi: 10.31474/1999-981X-2022-2-43-53

6. DSTU-NB EN 1993-1-1:2010 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1. General rules and regulations for buildings (EN 1993-1-1:2005/A1:2014, IDT). [Effective from 01.03.2013]. Ministry of Regional Development and Construction, 150.

7. DSTU-NB EN 1993-1-2:2010 Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-2. General provisions. Calculation of structures for fire resistance (EN 1993-1-2:2005, IDT). [Effective from 01.03.2013]. Ministry of Regional Development and Construction, 98.

8. Novak, S., Drizhd, V., Dobrostan, O. (2021). Evaluation of fire-resistant properties of coatings and facings for steel structures. Scientific bulletin: Civil protection and fire safety, 2(12), 43–53. doi: 10.33269/nvcz.2021.2(12).43-53

9. Buchanan, A. (2021). Structural design for fire safety. Corus Construction and Industrial. Fire resistance of steel-framed buildings, North Lincolnshire, 221.

© Н. П. Заїка

10. Pallares-Muñoz, M., Paya-Zaforteza, I., Hospitaler, A. (2021). New methodology using beam elements for the analysis of steel frames subjected to non-uniform temperatures due to fires, Structures, 31, 462–483. doi: 10.1016/j.istruc.2021.02.008

11. Sidnei, S., Myroshnyk, O., Kovalov, A., Veselivskyi, R., Hryhorenko, K., Shnal, T., Matsyk, I. (2024). Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7(130)), 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

12. Sidnei, S. O., Nuianzin, O. M., Kostenko, T. V., Berezovskyi, A. I., Wąsik, W. (2023). A Method of Evaluating the Destruction of a Reinforced Concrete Hollow Core Slab for Ensuring Fire Resistance. Journal of Engineering Sciences, Ukraine, 10(2), D1–D7. doi: 10.21272/jes.2023.10(2).d1

13. Dovbysh, A. (2006). Justification of the conditions for the use of plasterboard boards as fire-resistant finishing materials of building structures: thesis. PhD. technical Sciences: 21.06.02. Ukrainian Research Institute of Fire Safety, Kyiv, 204.

14. Sydney, S. O. (2024). Study of the influence of the finite-element grid on the temperature distribution over a hollow plate during fire simulation. Scientific bulletin: Civil protection and fire safety, 1(17), 93–102. doi: 10.33269/nvcz.2024.1(17).93-103

Надійшла до редколегії: 12.10.2024
Прийнята до друку: 13.11.2024

УДК 614.84

О. О. Кірєєв, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)*
Ю. К. Гапон, *доцент, к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-3304-5657)*
М. А. Чиркіна-Харламова, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2060-9142)*
Є. Д. Слепужніков, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5449-3512)*
О. В. Черкашин, *к.пед.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-3383-7803)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСОБУ ГАСІННЯ ЛЕГКОЗАЙМИСТИХ РІДИН

Проведено порівняння ефективності існуючих і нових засобів гасіння резервуарів зі стаціонарним дахом, що містять легкозаймисті рідини. В якості горючих рідин розглянуто легкозаймисті рідини. Обґрунтовано, що високі вогнегасні характеристики при гасінні легкозаймистих речовин можуть забезпечити таки засоби в яких домінуючим механізмом припинення горіння є ізоляція поверхні рідини від зони горіння. У світі в якості основного засобу гасіння рідин вимагають використовувати повітряно-механічні піни. Але для них властивий ряд недоліків. Одним з яких є мала стійкість піни від дії теплового потоку від полум'я рідини, що горить. Як альтернатива повітряно-механічним пінам запропоновано розглянути розроблені піни швидкого твердіння, а також системи піноскло + гель, піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода. Для порівняння властивостей нових вогнегасних систем і повітряно-механічних пін запропоновано використати кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежогасіння. Цей параметр враховує фінансові витрати на: вогнегасні речовин, їх зберігання, переробку або утилізацію після закінчення строку їх зберігання; обладнання та його експлуатацію; залучення додаткової техніки та персоналу, компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин. В цілому комплексний параметр ефективності розраховуються як сума сімох обраних фінансових складових. На першому етапі запропоновано використати спрощений бальний варіант розрахунку комплексного економічного параметру ефективності. Для цього складові ефективності визначається методом експертних оцінок. Найбільше значення комплексного параметру ефективності показали дві вогнегасних системи піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода. Для цих системи пропонується провести відповідні експериментальні дослідження на модельних вогнищах пожежі великого розміру.

Ключові слова: вогнегасна ефективність, гелеутворюючи легкозаймисті рідини, економічні параметри, піна швидкого твердіння, сипкі матеріали

1. Вступ

З моменту появи горючих рідин виникла проблема з їх гасіння. До теперішнього часу відбувається зростання об'ємів використання горючих рідин, що використовуються в різних галузях людського життя. Щорічно в світі вникає тисячі пожеж за участю таких рідин [1]. Найбільші труднощі виникають під час гасіння пожеж легкозаймистих рідин (ЛЗР) в резервуарах великих розмірів. Забезпечення гасіння таких пожеж потребує залучення великої кількості сил та засобів. У всьому світі нормативні документи в якості основного засобу гасіння рідин передбачають використання повітряно-механічних пін (ПМП) [2–6].

Для пінних засобів пожежогасіння властивий ряд недоліків. Одним з них є обмежений час існування піни на поверхні рідини, що горить. Це дозволяє зробити висновок, що для підвищення ефективності гасіння горючих рідин (ГР) і ЛЗР потребує створення більш стійкого до руйнування засобу пожежогасіння. Крім того, до недоліків пінних засобів пожежогасіння рідин можна віднести невисокі еколого-токсикологічні і економічні характеристики пін [7].

Для вибору найбільш ефективного вогнегасного засобу пожежогасіння є потреба у визначенні поняття ефективності пожежогасіння і факторів які визначають

 © О. О. Кірєєв, Ю. К. Гапон, М. А. Чиркіна-Харламова, Є. Д. Слепужніков та ін.

його. Такі фактори повинні базуватися на врахуванні економічних складових процесу пожежогасіння. У більшості наукових публікацій розглядались тільки фінансові витрати на вогнегасні речовини та обладнання. Таким чином можна констатувати актуальність потреби в розробці кількісних економічних характеристик ефективності засобів гасіння пожеж і вибору найбільш ефективного вогнегасного засобу .

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В теперішній час проводяться дослідження у напрямку підвищення ефективності засобів гасіння рідин. Значна їх частина спрямована на підвищення ефективності пінних засобів пожежогасіння. Так, вже впроваджено в практику пожежогасіння використання плівкоутворювальних піноутворювачів (ПУ) і компресійних пін. З нових розробок в цьому напрямку можна відмітити піни швидкого тверднення (ПШТ) [8] Вони були запропоновані для ізоляції розливів токсичних рідин. В роботах [9–10] було обґрунтовано використання ПШТ для гасіння рідин та визначено їх вогнегасну здатність при гасінні бензину.

Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок на багаторазову перевагу ПШТ по зрівнянню традиційними повітряно-механічними пінами (ПМП) за їх стійкістю і вогнегасною здатністю. Вогнегасна висота шару такої піни при гасінні бензину складає 2,5 см. Але одночасно наведені в відмічених роботах дані вказують, що не зважаючи на те, що візуально тверда піна зберігає свою цілісність декілька годин, вона з часом зменшує свої ізолюючи властивості.

Також можна виділити інші дослідження, спрямовані на покращення ефективності засобів гасіння рідин. В роботі [11] проведено моделювання створення протипожежної перешкоди за допомогою вибуху горючого заряду. Але використання такого підходу для гасіння резервуарів з рідинами не є об’єктивним, у зв’язку із можливістю руйнування під час вибуху ємності, що горить. В роботі [12] запропоновано використання імпульсного високошвидкісного струменя води для гасіння викиду парів газу. Основним механізмом гасіння в такому випадку є зрив полум’я. Здійснити такий метод гасіння резервуарів великих розмірів практично неможливо, оскільки важко забезпечити одночасне охоплення високошвидкісним струменем всієї поверхні горючої речовини.

В роботі [13] запропоновано удосконалення установки пожежогасіння дрібнодисперсною водою. Такий метод гасіння горючих рідин доцільно використання тільки для пожеж малої площі.

Результати роботи [14] можуть бути використані для підвищення ефективності гасіння пожеж класу «В» за допомогою пористих матеріалів. Проте в ній не представлено жодних конкретних рекомендацій щодо гасіння рідин. Результати математичного моделювання вогнезахисної ефективності покриттів на основі силікатної композиції наведені в роботі [15], що дозволяє провести оцінку теплоізолюючих властивостей відповідних покриттів нанесених на поверхню шару сипких матеріалів, які використовуються для гасіння рідин. Останній метод гасіння буде розглянуто нижче.

В роботі [16] наведено підхід до розрахунку вогнестійкості сталевих конструкцій з нанесенням спучувающихся покриттів, який доцільно використати для планування комплексу заходів із захисту резервуарів від теплового випромінювання сусідніх ємностей, що горять. Дослідження спрямоване на поліпшення екологічних характеристик піротехнічних аерозольних генераторів для гасіння пожеж різних класів [17]. Такий засіб пожежогасіння вважається перспективним для гасіння різних видів пожеж, але

його доцільно використання тільки для пожеж класу «В» малої площі.

На основі аналізу літературних даних в роботі [18] зроблено висновок про більшу перспективність розробки нових засобів гасіння рідин в яких в якості домінуючого механізму припинення горіння реалізується ізолюючий механізм. Такий механізм реалізується при використанні ПШТ [9–10], вогнегасних систем піноскло (ПС) + гель [18], ПС + сипкий матеріал (СМ), ПС + СМ + вода [19–20].

Кожен з цих методів має свої переваги і недоліки. Тому існує задача вибору найбільш ефективного методу гасіння пожеж резервуарів з горючими рідинами. Частково це питання розглянуто у роботах [18–20], але з часу їх публікації з'явились нові данні та підходи к співставленню ефективність вогненосних засобів.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми вибору найбільш ефективного вогненосного засобу для гасіння резервуарів з горючими рідинами є прийняття до уваги нових даних і розробки критеріїв їх ефективності.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка кількісних критеріїв ефективності засобів пожежогасіння і вибір на їх основі нових найбільш ефективних методів гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Визначити поняття ефективності пожежогасіння і фактори, які визначають його.

2. Розробити кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежогасіння.

3. Провести вибір нових засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами для подальшого аналізу їх ефективності.

4. Провести вибір найбільш ефективного засобу пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами.

Предметом дослідження є аналіз ефективності нових методів гасіння резервуарів легкозаймистими рідинами.

Основна гіпотеза дослідження полягає в можливості оцінки ефективності вогнегасного засобу за допомогою кількісного комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння який базується на економічних параметрах вогнегасної системи.

Методи дослідження:

– комплексний аналіз і узагальнення літературних даних з визначення вогнегасної здатності нових засобів гасіння пожеж класу «В», в яких реалізується ізолюючий механізм припинення горіння;

– аналіз лабораторних і натурних методів визначення вогнегасної здатності засобів гасіння легкозаймистих рідин;

– стандартні експериментальні методи визначення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння, які модифіковані з урахуванням особливостей систем на основі сипких матеріалів і швидкотвердіючих пін;

– порівняльний аналіз фізико-хімічних характеристик, та економічних параметрів речовин і матеріалів, які використовуються в різних способах гасіння пожеж;

 © О. О. Кірєєв, Ю. К. Гапон, М. А. Чиркіна-Харламова, Є. Д. Слепужніков та ін.

– елементи економічного аналізу і метода експертного оцінювання фінансових втрат прі гасінні ЛЗР.

5. Вибір нових ефективних методів гасіння пожеж резервуарів з легкозаймистими рідинами

5.1. Визначення поняття ефективності пожежогасіння і факторів, які визначають його

В ДСТУ 2272 : 2006 «Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять» відсутнє поняття ефективність пожежогасіння. Але є термін – показник вогнегасної здатності вогнегасної речовини. Він визначається як маса вогнегасної речовини, що припадає на одиницю площі модельного вогнища пожежі або його об'єму для впевненого гасіння в ньому в умовах стандартного експерименту.

Також в цьому державному стандарті є термін показник вогнегасної здатності технічного засобу пожежогасіння – площа модельного вогнища пожежі або об'єм (площа) модельної споруди з модельним(и) вогнищем(-ами) пожежі, в якому (на якій) вогонь можна впевнено загасити за допомогою одного технічного засобу пожежогасіння в умовах стандартного експерименту. В цьому випадку з урахуванням того, що в технічному засобі міститься строго визначена маса вогнегасної речовини можна констатувати, що показник вогнегасної здатності як речовини так і технічного засобу пожежогасіння дорівнює масі вогнегасної речовини потрібної для гасіння одиниці площі або об'єму модельного вогнища пожежі. Тобто показник вогнегасної здатності (Вз) можна математично визначити формулою:

$$Вз = \frac{m}{S}, \quad (1)$$

де m – маса вогнегасної речовини потрібної для гасіння, S – площа поверхні горіння.

В науковій та навчальній літературі [18–21] термін вогнегасна ефективність трактується більш широко ніж показник вогнегасної здатності. Він звичайно включає в собі крім масових витрат вогнегасної речовини їх економічні та екологічні параметри, експлуатаційні характеристики обладнання і вогнегасних речовин, можливі збитки від дії вогнегасних речовин. В разі гасіння пожеж резервуарів основним збитком є забруднення горючої рідини вогнегасними речовинами. Це призводить до неможливості її реалізації та в багатьох випадках унеможливлює її переробку.

При оцінці економічних параметрів різних методів гасіння враховувалася вартість речовин та устаткування для їх подачі і зберігання, а також експлуатаційні витрати. Крім того під час вибору ефективного засобу гасіння доцільно враховувати універсальність методу пожежогасіння. Перевага треба віддати таким вогнегасним засобам, якими можна гасити різни види рідин: ГР, ЛЗР, полярні і неполярні.

5.2. Розробка кількісного комплексного параметру ефективності засобів пожежогасіння.

В роботах [20, 22] запропоновано для оцінки ефективності вогнегасних засобів використовувати комплексний параметр ефективності (Еф):

$$\text{Еф} = \frac{\text{результат}}{\text{вартість}}. \quad (2)$$

Під результатом мається на увазі – гасіння пожежі резервуару. В цій роботі в якості економічного параметру – прийнята вартість вогнегасних речовин, яка пішла на гасіння. В загальному випадку фінансовий параметр набагато складніший. Він повинен крім вартості вогнегасних речовин (ВР) (складова 1) враховувати такі фінансові витрати:

– складова (2) на зберігання ВР;

– складова (3) переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;

– складова (4) на обладнання та його експлуатацію;

– складова (5) пов'язана з обмеженнями, які обумовлені потребою забезпечення інтенсивність подавання ВР вище критичної;

– складова (6) на компенсацію збитків від процесу гасіння;

– складова (7) на компенсацію екологічної шкоди від ВР;

Тоді загальна ефективність буде дорівнювати сумі декількох складових:

$$\text{Еф} = \text{Еф1} + \text{Еф2} + \text{Еф3} + \text{Еф4} + \text{Еф5} + \text{Еф6} + \text{Еф7}. \quad (3)$$

В роботах [20, 22] розглянуто тільки одну складову, яку відносно легко визначити – фінансові витрати на ВР. Інші економічні параметри визначити більш складно, деякі з них заздалегідь визначити неможливо. Це в першу чергу відноситься до нових перспективних засобів гасіння. Для них, ще не розроблено обладнання яке можна використовувати для гасіння реальних пожеж.

На першому етапі можна запропонувати спрощений бальний варіант розрахунку комплексного економічного параметру. Для цього кожна складова ефективності визначається методом експертних оцінок [23]. Для експертів надається інформація по кожному методу гасіння з наведенням відповідних даних з масових витратах ВР, вартості ВР, потрібного обладнання, умов зберігання ВР, особливостей переробки або утилізації ВР, впливу ВР на рідини під час гасіння та токсико-екологічних характеристик ВР. Крім того, відмічається особливість таких засобів пожежогасіння для яких нема обмежень з забезпечення інтенсивності подавання ВР. До таких засобів відноситься система ПС + СМ. В цієї системі ізолюючий шар на поверхні ЛЗР не руйнується під впливом теплового випромінювання від полум'я. Не суттєві обмеження з інтенсивності подавання компонентів ВР відноситься до ПШТ, вогнегасних систем піноскло (ПС) + гель, ПС + СМ + вода. Це пояснюється тим, що компоненти цих систем наносяться на такий шар ПС, який забезпечує низьку інтенсивність горіння ЛЗР А також тим, що ПШТ і гель мають високу вогнестійкість.

Підбір експертів проводився з урахуванням їх компетентності для оцінки відповідного параметру. Нижче наведено запропоновану бальну шкалу внеску різних складових вогнегасної ефективності в комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу:

1 – низьке значення;

2 – середнє значення;

3 – високе значення;

4– дуже високе значення.

 © О. О. Кірєєв, Ю. К. Гапон, М. А. Чиркіна-Харламова, Є. Д. Слепужніков та ін.

5.3. Вибір засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами для аналізу ефективності

Раніше було обґрунтовано перевагу методів гасіння ЛЗР в резервуарах в яких домінуючим механізмом припинення горіння є ізоляція поверхні рідини [18]. На відміну від інших методів гасіння, в яких не реалізується ізолюючий механізм припинення горіння, вони дозволяють за рахунок ізоляції поверхні рідини забезпечити зниження концентрації парів рідини одночасно над усією поверхнею менше нижньої концентраційної межі поширення полум'я.

З розглянутих вище нових методів гасіння пожеж класу «В» цей механізм реалізується в ПШТ та системах ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода. В якості СМ обрані дані для спученого перліту з розміром гранул з розміром гранул кулеподібної форми (1,2±0,2) мм. Подрібнене піноскло уявляло собою гранули неправильної форми розміром 10–15 мм. Піноутворювальна система для одержанні ПШТ мала склад $Na_2O{\cdot}2{,}5SiO_2$ (9 %)+$NaHCO_3$ (9 %)+ПУ(6 %)+карбометилцелюлоза (КМЦ) (0,5 %). За даними робіт [8, 9–10, 18–20] ці вогнегасні системи можуть забезпечити більший по зрівнянню з ПМП час існування ізолюючого шару. Ці висновки відносяться до ЛЗР.

Для адекватного порівняння вогнегасної ефективності різних засобів пожежогасіння їх характеристики потрібно порівнювати за однакових умов проведення експерименту. Результати робіт [10, 20] дозволяють це зробити для всіх обраних систем в разі вибору результатів, отриманих на стандартизованому модельному вогнищі пожежі «2В». В потрібних випадках приведені в роботах дані по витратам вогнегасних речовин на гасіння перераховані в кг/м^2. Також в цієї роботі для порівняння були розраховані складові вогнегасної ефективності і комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу для ПМП. Треба відмітити, що в розглянутих роботах не приймався до уваги такий параметр, як оптимальна інтенсивність подавання ВР. Це пов'язано з тим, що для обраних нових вогнегасних систем інтенсивність подавання ВР практично не впливає на її масову витрату. Це обумовлено тим, що вогнегасні шари сипких матеріалів практично не руйнуються під дією полум'я.

5.4. Вибір найбільш ефективного засобу пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами

З відмічених вище робіт були обрані данні з вогнегасної здатності нових вогнегасних засобів для випадку гасіння ними найбільш поширеної ЛЗР – бензину. На цій основі була проведена експертна оцінка складових комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу (Еф (1–7) та сумарне значення цього параметру (Еф). Для отримання експертних оцінок було залучено 9 практичних і наукових фахівців різних спеціальностей в областях пожежогасіння, переробки нафти, пожежної техніки, хімічної технології, економіки та екології. При цьому було використано напівсліпий метод – по можливості не вказувалось конкретний засіб пожежогасіння, а тільки загальні характеристики потрібного обладнання, речовин, матеріалів, їх вартість, вогнегасну здатності та клас небезпеки речовин. Винятком було розкриття тільки одного засобу пожежогасіння – ПМП. Відповідні складові комплексного параметру ефективності потрібно було оцінити використовуючи запропоновану бальну шкалу внеску різних складових вогнегасної ефективності в комплексний параметр ефективності вогнегасного засобу. Кожен експерт самостійно вибирав для оцінювання складову комплексного параметру ефективності в якій він вважав собі компетентним.

Нижче в табл. 1 наведені середні результати для кожної складової комплексного параметру ефективності вогнегасного засобу та сумарне значення загального параметру ефективності, які отримані для ПШТ та систем ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода. Також наведені відповідні результати для ПМП, які отримані при гасінні стандартизованого модельного вапнища пожежі «2В». У випадку вогнегасної здатності ПМП результати визначення фінансових витрат на ВР суттєво відрізняються від таких, що наведено в роботах [18–20].

В цих роботах вогнегасну здатність ПМП розраховано входячи з нормативних вимог з інтенсивності і часу подавання піни на гасіння резервуару РВС – 5000 [24].

Табл. 1. Вогнегасна здатність, складові показника вогнегасної ефективності (Еф 1-7) та сумарне значення комплексного параметру ефективності (Еф)

Складові комплексного показника вогнегасної ефективності	Вогнегасна система/ Вогнегасна здатність, кг/м^2				
	ПМП/ 2,6–2,9*, 26–29**	ПШТ/ 2,8*, 5,6**	ПС+гель/ 12+2	ПС+СМ/ 6,7+3,2	ПС+СМ+ +вода/6,7+ +1,6+2,0
Еф1, грн	9,4 – 10,4	28,5	250	219	185
Еф1 бали	4	3,5	1,2	1,3	2,2
Еф2 бали	2,3	1,5	1,8	3,7	3,3
Еф3 бали	2,2	1,7	2,5	3,8	3,8
Еф4 бали	3,0	2,0	1,4	3,0	2,6
Еф5 бали	2,2	2,4	3,0	3,8	3,2
Еф6 бали	1,2	1,5	2,8	4,0	3,3
Еф7 бали	1,6	1,6	2,6	4,0	3,8
Еф бали	**16,5**	**15,2**	**15,3**	**23,6**	**22,2**

* – без урахування руйнування піни.

** – з урахуванням руйнування піни.

Це пояснюється тім, що гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі «2В» відбувається протягом 10–20 с, а гасіння ПМП резервуарів великого розміру потребує десятки хвилин. За такий час значна частина піни руйнується. Це в свою чергу збільшує загальну витрату піни в десятки разів. Для подальших розрахунків вогнегасної здатності приймемо, що в ході гасіння руйнується ~90 % ПМП.

У випадку використання ПШТ її руйнування на порядок менше ніж ПМП [10]. В цієї роботі прийнято, що в ході гасіння руйнується 50 % ПШТ. Для вогнегасних систем ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода верхній ізолюючий шар практично не руйнується. Тому її витрати на гасіння резервуарів великого розміру будуть близькими до таких, що отримані під час гасіння стандартизованого модельного вогнища пожежі «2В».

6. Обговорення результатів визначення комплексного параметру ефективності

На відміну від більшості попередніх оцінок ефективності вогнегасних засобів пожежогасіння було обрано економічний підхід, який враховує сім складових. При цьому експертам були надані такі дані:

- показник вогнегасної ефективності;
- вартості ВР;
- умови і гарантований час зберігання ВР;
- оцінка витрат на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання;

- запропоноване обладнання для подавання ВР, та особливості його експлуатації;

- обмеження з забезпечення інтенсивності подавання ВР вище критичної;

- вплив ВР на властивості рідини яку гасять, вартість цієї рідини;

- клас небезпеки ВР, їх летучість, розчинність у воді і вуглеводневих рідинах.

Особливостями запропонованого підходу є використання методу експертних оцінок і чотирьох бальна шкала оцінювання комплексного параметру ефективності пожежогасіння.

За показником вогнегасної здатності найкращі результати показали ПШТ, трохи гірші ПМП. Але цей показник не є економічним і враховується параметром Еф1.

Еф1. За вартістю компонентів ВР найкращі результати мають ПМП. Це обумовлено тім, що в ПШТ в їх складі крім ПУ присутні таки речовини: $Na_2O{\cdot}2{,}5SiO_2$ (9 %), $NaHCO_3$ (9 %) і + КМЦ(0,5 %). Системи на основі сипких матеріалів (ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ + вода) мають гірші показники за параметром вогнегасна здатність і вартості ВР.

Еф2. За параметром «витрати на зберігання ВР» вогнегасні системи ПС + СМ і ПС + СМ + вода мають безумовну перевагу, вони мають не обмежений час зберігання та не потребують особових вимог до умов зберігання. На відміну від них ШТП і система ПС+ гель мають в своєму складі два розчини, які потребують окремого зберігання. Причому склад цих розчинів потрібно підтримувати в строго визначених межах. Це вимагає ізоляції цих розчинів від контакту з атмосферним повітрям. Крім того, розчини з гелеутворювачем – силікатом натрію потребують захисту від їх замерзання, а їх гарантований термін зберігання складає 1 рік.

Еф3. За параметром «витрата на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання» найкращій показник мають вогнегасні системи ПС + СМ і ПС + СМ + вода, завдяки тому, що їх компоненти мають не обмежений час зберігання та їх можна повторно використовувати після гасіння ЛЗР після простої процедури висушування. Найгірші показники за цим параметром мають системи ПШТ та ПС+гель, завдяки їх багатокомпонентності. ПМП мають більш високий показник за цім параметром тому, що має в своєму складі тільки один компонент – ПУ, який можна використовувати за іншим призначенням як поверхнево-активну речовину.

Еф4. Складним параметром для оцінювання експертами є складова комплексного параметра ефективності вогнегасного засобу пов’язана з оцінкою витрат на обладнання та його експлуатацію. Це обумовлено тім що більшості фахівців з пожежної безпеці маловідомі засоби для подавання сипких матеріалів. Але можна відмітити, що такі засоби реально існують і їх можна пристосувати для подавання ПС і СМ. Більшість експертів надали найбільшу оцінку засобам подавання ПМП і системі ПС+СМ завдяки з потребою подавання тільки одного та двох складових. Меншу оцінку отримала система ПС+гель, яка потребує крім подавання ПС ще і роздільне-одночасне подавання двох розчинів – гелеутворювача і каталізатора гелеутворення. Вогнегасна система ПС+СМ+вода також отримала низьку оцінку завдяки потребу роздільного подавання трьох складових системи.

Еф5. Складова комплексного параметра ефективності вогнегасного засобу пов’язана з потребою або відсутності потреби забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність. В разі відсутності такої потреби можна зменшити потужність відповідного обладнання. Найбільшу кількості балів отримала система ПС+СМ, а найменшу ПМП. Для останньої системи характерна низька стійкість по відношенню до теплового випромінювання від полум’я ріди-

ни, що горить. Це в сою чергу потребує таку інтенсивність подавання піни, яка перевищує швидкість її руйнування.

Еф6. За параметром пов'язаним з компенсацію збитків від процесу гасіння було прийнято до уваги, що в разі гасіння пожеж резервуарів основним збитком є забруднення горючої рідини вогнегасними речовинами. Важливість цього економічного параметру можна оцінити розрахував вартість зіпсованого бензину під час гасіння резервуару місткістю 5000 м^3. Якщо прийняти оптову вартість 1 л бензину 40 грн, то економічні втрати складуть 200 млн грн. За цім параметром перевагу мають вогнегасні системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Обидва сипких матеріали не токсичні, хімічно і термостійкі, вони не розчинюються в більшості горючих рідин. Їх видалення з більшості ЛЗР відносно проста задача. Наявність ПУ в ПМП і ПШТ приводе до суттєвого забруднення рідини яку гасять в зв'язку з утворенням стійкої емульсії.

Еф7. Оцінювання втрат на компенсацію екологічної шкоди від ВР показує, що за цім параметром перевагу мають вогнегасні системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Це обумовлено тім, що їх компоненти не токсичні, хімічно інертні, термостійкі і вони класифікуються як речовини 4 класу небезпеки.

Еф. Дані отримані сумуванням складових ефективності Еф(1–7) вказують, що за сумарним комплексним параметром ефективності вогнегасного засобу найкращі результати отримали системи ПС+СМ і ПС+СМ+вода. Це обумовлено високими оцінками за параметрами: витрати на зберігання ВР, витрата на переробку або утилізацію ВР після закінчення строку їх зберігання, відсутності потреби забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність, компенсацію збитків від процесу гасіння, компенсацію екологічної шкоди від ВР.

Крім цього до позитивних характеристик цих засобів гасіння які не включено до економічних параметрів можна відмітити великий термін зберігання ізолюючих властивостей та наявність виробництв ПС і СМ в Україні.

В багатьох роботах основна увага при оцінюванні економічних характеристик вогнегасних засобів обираються тільки фінансові витрати на ВР. В роботах [10, 18–20, 22] наведено дані які дозволяють розрахувати витрати на ВР при гасінні резервуару РВС-5000 (площа 400 м^2) з бензином. Вони складають для вогнегасних систем ПМП, ПШТ, ПС+гель, ПС + СМ і ПС + СМ+ + вода 400 тис. грн, 11,4 тис. грн, 100 тис. грн, 87,6 тис. грн і 73,6 тис. грн відповідно. Це на багато порядків менше вартості зіпсованого бензину – 200 млн грн. Одночасно це вказує на необхідність враховувати додаткових економічних складових процесу: гасіння резервуарів з ЛЗР.

Подальшими напрямками досліджень є – проведення експериментальних досліджень на модельних вогнищах пожежі великого розміру та оцінка ефективності засобів гасіння висококиплячих і полярних рідин з використанням запропонованого підходу. При цьому треба бути прийняти до розгляду також засоби пожежогасіння в яких в більшої ступені реалізуються інші механізми припинення горіння. Крім цього треба переходити від бальної системи оцінки економічного параметру до грошової. Це потребує залучення відповідних фахівців.

7. Висновки

1. Обґрунтовано введення поняття економічної ефективності пожежогасіння і факторів які визначають його.

2. Розроблено кількісний комплексний параметр ефективності засобів пожежо-

 © О. О. Кірєєв, Ю. К. Гапон, М. А. Чиркіна-Харламова, Є. Д. Слепужніков та ін.

гасіння який включає 7 економічних складових, які обумовлені фінансовими витратами на: вогнегасні речовини; зберігання вогнегасних речовин; переробку або утилізацію вогнегасних речовин після закінчення строку їх зберігання; обладнання та його експлуатацію; забезпечення інтенсивності подавання ВР яка перевищує критичну інтенсивність; компенсацію збитків від процесу гасіння; компенсацію екологічної шкоди від вогнегасних речовин. Для розрахунку складових ефективності засобів пожежогасіння запропонована 4-х бальна система оцінювання.

3. Проведено вибір нових засобів пожежогасіння резервуарів з легкозаймистими рідинами: піни швидкого твердження, системи піноскло + гель, піноскло + сипкий матеріал і піноскло + сипкий матеріал + вода.

4. Методом експертних оцінок визначено 7 складових вогнегасної ефективності і сумарний комплексний параметр вогнегасної ефективності обраних засобів пожежогасіння. Для порівняння проведено розрахунок комплексного параметру ефективності для повітряно-механічних пін. За значенням комплексного параметру ефективності розглянуті вогнегасні системи розташувалися в наступному порядку: піноскло + сипкий матеріал –23,6; піноскло + сипкий матеріал + вода – 22,2; повітряно-механічні піни – 16,5; піноскло + гель – 15,3; піни швидкого тверднення – 15,2.

Література

1. Hylton J. G., Stein G. P. U.S. Fire Department Profile. National Fire Protection Association. 2017. URL: https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf

2. 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

3. 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

4. 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

5. EN 1568-4. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids. European committee for standardization, 2018. 55 p. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/333cc3e6-35bc-4525-9e86-7c51a8be409f/en-1568-4-2018

6. ДСТУ EN 2:2014 Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63091

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. Pietukhov R., Kireev A., Tregubov D., Hovalenkov S. Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly

Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. Materials Science Forum. 2021. Vol. 1038. P. 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.374

9. Musayev M. E., Dadashov I. F. Development of a single means for preventing the evaporation of toxic liquids and extinguishing class B fires. Academy of the Ministry of Emergencies of the Republic of Azerbaijan. 2021. Vol. 3–4. C. 117–124. URL: https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf

10. 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

11. 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

12. Semko A., Rusanova O., Kazak O., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Gricina I. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. The International Journal of Multiphysics. 2015. Vol. 9(1). P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9/

13. 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/

14. 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

15. 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

16. 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

17. 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

18. Дадашов І. Ф., Кірєєв 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

19. 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

20. Макаренко В. С., Кірєєв О. О., Чиркіна-Харламова М. А., Мінська Н. В., Шаршанов А. Я. Дослідження гасіння модельного вогнища пожежі класу «В» сипкими матеріалами. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Вип. 2(38). С. 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

21. 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. Харків: ФОП Панов А. М., 2024. 216 с. ISBN 978-617-8113-75-9. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/%d0%a4%d0%a5%d0%9e%d0%9f%d0%a0%d0%bf%d1%80%d0%b5%d0%bf%d1%80%d1%96%d0%bd%d1%82.pdf

22. Макаренко В. С., Кірєєв О. О., Чиркіна-Харламова М. А., Слепужніков Є. Д., Ковальов О. О. Вогнегасні характеристики легких сипких матеріалів для пожеж класу «В». ISSN 2524-0226. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. Вип. 1(39). С. 40–54. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

23. Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Єременко С. А., Пруський А. В. Методичні засади пожежного аудиту вибухонебезпечних об'єктів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2020. № 2(10). С. 3–14. doi: 10.33269/nvcz.2020.2.3-14

24. НАПБ 05.035-2004. Інструкція щодо гасіння пожеж в резервуарах із нафтою та нафтопродуктами. Київ: УНДІПБ, 2004. 79 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71121

A. Kireev, *DSc, Professor, Professor of the Department*
Yu. Hapon, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
Ye. Slepuzhnikov, *PhD, Associate Professor, Head of the Department*
M. Chyrkina-Kharlamova, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
O. Cherkashyn, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

SELECTION OF THE MOST EFFECTIVE MEANS OF EXTINGUISHING FLAMMABLE LIQUIDS

The paper compares the effectiveness of existing and new means of extinguishing tanks with a fixed roof containing flammable liquids. Flammable liquids are considered as combustible liquids. It is substantiated that high fire extinguishing characteristics when extinguishing flammable substances can be provided by means in which the dominant mechanism of combustion termination is the isolation of the liquid surface from the combustion zone. Currently, worldwide regulatory documents require the use of air-mechanical foams as the main means of extinguishing liquids. But they have a number of disadvantages. One of them is the low resistance of the foam to the heat flow from the flame of the burning liquid. As an alternative to air-mechanical foams, it is proposed to consider the recently developed fast-curing foams, as well as foam-glass + gel, foam-glass + bulk material, and foam-glass + bulk material + water systems. To compare the properties of new fire extinguishing systems and air-mechanical foams, it is proposed to use a quantitative complex parameter of the effectiveness of fire extinguishing agents. This parameter takes into account the financial costs of: fire extinguishing agents, their storage, processing or disposal after the expiration of their storage period; equipment and its operation; involvement of additional equipment and personnel, compensation for losses from the extinguishing process; compensation for environmental damage from fire extinguishing agents. In general, the comprehensive efficiency parameter is calculated as the sum of the seven selected financial components. At the first stage, it is proposed to use a simplified scoring option for calculating the complex economic parameter of efficiency. To do this, the components of efficiency are determined by the method of expert assessments. The highest value of the complex efficiency parameter was shown by two fire extinguishing systems: foam glass + bulk material and foam glass + bulk material + water. For these systems, it is proposed to conduct appropriate experimental studies on model fires of large size.

Keywords: fire extinguishing efficiency, gel-forming flammable liquids, economic parameters, quick-setting foam system, bulk materials

References

1. Hylton, J. G., Stein, G. P. U.S. (2017). Fire Department Profile. National Fire Protection Association. Available at: https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics/Fire-service/osfdprofile.pdf

2. 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. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/29188adf-ed7b-49cf-9e76-b996ab64fd89/en-1568-1-2018

3. 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. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/1b7c7790-8464-4bc4-9ec6-b98ac41ff5ed/en-1568-2-2018

4. 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. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6e79e77f-10b9-4be3-b589-23797d03ae3b/en-1568-3-2018

5. EN 1568-4. Fire extinguishing media – Foam concentrates – Part 4: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-miscible liquids. European committee for standardization, 2018, 55. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/333cc3e6-35bc-4525-9e86-7c51a8be409f/en-1568-4-2018

6. DSTU EN 2:2014 Klasyfikatsiia pozhezh (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63091

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. Pietukhov, R., Kireev, A., Tregubov, D., Hovalenkov, S. (2021). Experimental Study of the Insulating Properties of a Lightweight Material Based on Fast-Hardening Highly Resistant Foams in Relation to Vapors of Toxic Organic Fluids. Materials Science Forum, 1038, 374–382. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1038.374

9. Musayev, M., Dadashov, I. (2021). Development of a single means for preventing the evaporation of toxic liquids and extinguishing class B fires. Academy of the Ministry of Emergencies of the Republic of Azerbaijan, 3–4, 117–124. Available at: https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf

10. 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

11. 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

12. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. The International Journal of Multiphysics, 9(1), 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9/

13. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water Eastern Eu-

ropean Journal of Enterprise Technologies, 2, 10–92, 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865/

14. 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. (2017). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 5–87, 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

15. 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

16. 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/matecconf/201823002036

17. 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

18. Dadashov, I., Kirieiev, O., Trehubov, D., Tarakhno, O. (2021). Hasinnia horiuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoriuiuchymy systemamy. Kharkiv, 240. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033

19. 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

20. Makarenko, V., Kirieiev, O., Chyrkina-Kharlamova, M., Minska, N., Sharshanov, A. (2023). Doslidzhennia hasinnia modelnoho vohnyshcha pozhezhi klasu «V» sypkymy materialamy. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 2(38), 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

21. Trehubov, D., Dadashov, I., Minska, N., Hapon, Yu., Chyrkina-Kharlamova, M. (2024). Fizyko-khimichni osnovy rozvitku ta hasinnia pozhezh horiuchykh ridyn. Kharkiv: FOP Panov A. M., 216. ISBN 978-617-8113-75-9. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/19111/3/%d0%a4%d0%a5%d0%9e%d0%9f%d0%a0%d0%bf%d1%80%d0%b5%d0%bf%d1%80%d1%96%d0%bd%d1%82.pdf

22. Makarenko, V., Kirieiev, O., Chyrkina-Kharlamova, M., Slepuzhnikov, Ye., Kovalov, O. (2024). Vohnehasni kharakterystyky lehkykh sypkykh materialiv dlia pozhezh klasu «V». ISSN 2524-0226. Problemy nadzvychainykh sytuatsii, 1(39), 40–54. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-3

23. Azarov, S., Sydorenko, V., Yeremenko, S., Pruskyi, A. (2020). Metodychni zasady pozhezhnoho audytu vybukhonebezpechnykh ob'iektiv. Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka, 2(10), 3–14. doi: 10.33269/nvcz.2020.2.3-14

24. NAPB 05.035-2004. Instruktsiia shchodo hasinnia pozhezh v rezervuarakh iz naftoiu ta naftoproduktamy. Kyiv: UNDIPB, 2004, 79. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=71121

Надійшла до редколегії: 08.10.2024
Прийнята до друку: 14.11.2024

УДК 614.8.06

***А. А. Лесько*[1]**, *ад'юнкт (ORCID 0009-0003-2053-2362)*
***О. В. Кулаков*[1]**, *к.т.н., доцент, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)*
***С. О. Домолега*[2]**, *н.с. відділу (ORCID 0009-0000-9796-9181)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна*
[2]*Науково-дослідний інститут воєнної розвідки, м. Київ, Україна*

МОДЕЛЬ ПРИМУСОВОГО ОСАДЖЕННЯ ВАЖКИХ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

Побудована модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких небезпечних газів (небезпечних хімічних речовин із густиною більшою за атмосферне повітря). Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю отриманої моделі є врахування під час розповсюдження важкого газу процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції газів краплинами рідини. Встановлено, що розповсюдження важких газів в атмосфері виявляє ознаки потоку рідини та отримана модель є перехідним варіантом між системами моделей дифузії газів та гідродинамічними моделями потоку рідин. Врахування припущення про нестискаємість газу за рахунок значної різниці швидкостей звуку між важким газом, що досліджувався, та повітрям дозволило отримати спрощений вигляд перехідного режиму. Результати моделювання апробовано на прикладі викиду хлору із точкового джерела й показали, що вплив швидкості вітру на інтенсивність осадження набагато меншою у порівнянні з аміаком, що збільшує вагомість внеску процесу дифузії. Отримана модель дозволяє прогнозувати розміри зони хімічного ураження при аваріях з викидом важких газів при їх активному осадженні стаціонарними або мобільними розпилювачами. В якості стаціонарних розпилювачів можуть розглядатись водяні завіси на технологічних отворах об'єктів зберігання та експлуатації важких газів. В якості мобільних розпилювачів може розглядатись робота рятувальних підрозділів на місці аварії. Прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій із викидом небезпечних газів дозволить підвищити точність проектування системи безпеки на таких об'єктах та допоможе у прийнятті ефективних рішень керівником ліквідації надзвичайної ситуації такого характеру.

Ключові слова: важкі гази, густина, примусове осадження, прогнозування наслідків аварії, рівняння Нав'є-Стокса, сорбція

1. Вступ

Ліквідація аварій на хімічних підприємствах є критично важливим завданням з кількох причин. Хімічні речовини, що використовуються на таких підприємствах, часто є токсичними, корозійними або вибухонебезпечними. Внаслідок аварії може статися викид шкідливих речовин в атмосферу, воду або ґрунт, що призведе до забруднення довкілля та загрози здоров'ю людей, які проживають поблизу. Хімічні аварії можуть спричинити значні екологічні наслідки, такі як загибель рослин і тварин, забруднення водних ресурсів та порушення природних екосистем. Ліквідація аварії дозволяє мінімізувати шкоду для довкілля та сприяє його відновленню. Також аварії на хімічних підприємствах, як правило, призводять до матеріальних збитків внаслідок руйнування обладнання, будівель та інфраструктури, а також втрати продукції. Швидка та ефективна ліквідація аварії допомагає зменшити ці збитки.

Аналіз причин аварії та проведення заходів з її ліквідації дозволяє виявити недоліки в системах безпеки та розробити заходи для їх усунення, що зменшує ризик повторних аварій.

Основні завдання ліквідації аварій на хімічних підприємствах спрямовані на локалізацію аварії, тобто зупинку подальшого поширення шкідливих речовин та запобігання їх потрапляння в навколишнє середовище. Ліквідація джерела аварії

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

проводиться шляхом усунення причин аварії, таких як витік хімічних речовин, пошкодження обладнання тощо. Невід'ємним етапом ліквідації аварій на хімічних підприємствах є надання медичної допомоги постраждалим та інформування населення про ситуацію та рекомендації щодо безпечної поведінки.

Останнім етапом ліквідації таких аварій є очищення території від шкідливих речовин та відновлення її безпечного стану.

Для ефективної ліквідації аварій на хімічних підприємствах необхідно мати план реагування та підготовлений персонал, здатний швидко та ефективно діяти в екстремальних ситуаціях.

Одним з основних методів ліквідації аварій з викидом небезпечних газів є осаджування хмари водою. Це дозволяє зменшити концентрацію небезпечного газу. Вода допомагає розбавити небезпечний газ, знижуючи його концентрацію в повітрі, що зменшує ризик отруєння. Додатковим механізмом може бути нейтралізація. Наприклад хлор реагує з водою, утворюючи хлоридну кислоту, яка менш небезпечна, ніж газоподібний хлор. Це допомагає зменшити агресивність хімічної речовини. Вода утворює бар'єр, що перешкоджає подальшому поширенню небезпечному газу в атмосфері, знижуючи ризик отруєння людей та зараження оточуючого середовища. Однак на ці процеси впливає велика низка фізичних та хімічних факторів, що суттєво ускладнює чисельне моделювання процесу. Хоча на сьогодні вже існує теоретичний та програмний апарат для прогнозування осадження небезпечних газів, всі вони спрямовані на гази легші за повітря.

Таким чином, проблема неможливості врахування процесів осадження небезпечних газів з густиною більше за повітря при прогнозуванні наслідків надзвичайних ситуацій є актуальною.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

По інформації з бюлетеня глобальних загроз [1] щорічно у світи виникає не менше 20 аварій на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО) [1]. Основною причиною виникнення таких аварій є порушення нормального ходу технологічного процесу внаслідок впливу людського фактору. Аварії на ХНО, звичайно супроводжуються розгерметизацією резервуарів, в яких знаходяться небезпечні хімічні речовини (НХР), що призводить до появи зони ураження великих розмірів й, як наслідок, значних людських жертв. 28 лютого 2019 року у штаті Алабама (США) стався витік хлору на підприємстві з водопостачання Birmingham Water Works, госпіталізовані понад 50 осіб [2]. Причиною витоку НХР в Birmingham Water Works називають випадкове змішування гіпохлориту натрію і сульфату заліза.

01 грудня 2021 року на території підприємства «Південьвійськбуд» (м. Одеса, вул. Боровського, 41а) стався витік хлору внаслідок розгерметизації ємності об'ємом 800 літрів [1]. Безпосередньо в зоні аварії гранично допустимі концентрації хлору було перевищено у 39 разів. Виток припинено шляхом накладання бандажу на ємність, що розгерметизувалася, дегазація місця розливу проведена шляхом осадження хлору розчином соди у воді.

24 лютого 2022 року розпочався відкритий воєнний напад Російської Федерації на Україну. Ймовірність появи аварій на ХНО з викидом НХР суттєво збільшилася.

Для оцінювання розміру зони хімічного забруднення є необхідним врахування певної кількості факторів, які доцільно умовно поділити на три блоки [3]:

- зовнішні метеорологічні умови, зокрема, температура та вологість повіт-

ря, швидкість та напрямок вітру, атмосферний тиск;

- властивості НХР, зокрема, від та агрегатний стан речовини, її фізико-хімічні параметри, умови її зберігання (температура, тиск) та інтенсивність викиду;
- параметри примусового осадження НХР, зокрема, вид та фізики-хімічні властивості рідини, що подається для осадження, площа осадження тощо.

Швидкість ліквідації аварії з викидом НХР суттєво залежить від управлінських рішень керівника ліквідації НС, вплив на які оказує точність прогнозування її розвитку.

Відомі різні математичні моделі розповсюдження НХР. Більшість з них базуються на розв'язанні рівнянь Гауса, наприклад модель, що використовується Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) [4]. Модель дозволяє розраховувати дисперсії на основі наявних метеорологічних параметрів при прямолінійній траєкторії розповсюдження хмари НХР. Модель призначена для експрес-оцінки наслідків аварій, що супроводжуються радіоактивним забрудненням на невеликих відстанях від осередку забруднення [5]. Основним недоліком моделі є складність розрахунку та необхідність введення значної кількості вхідної інформації про розвиток НС, що складно забезпечити в реальних умовах ліквідації НС.

В роботі [6] прогнозування наслідків забруднення атмосфери здійснюється на основі розрахунку динаміки розвитку аварії.

В роботі [7] при побудові моделі здійснюється з використанням рекурентного аналізу обробка значного масиву вихідної інформації про аварію. Недоліком побудованої моделі є залежність точності прогнозування від об'єму вихідних даних, збір яких є утрудненим в реальних умовах розвитку аварії.

Широко розповсюдженими є експрес-методи, що враховують лише найсуттєвіші фактори [8]. Такий підхід дозволяє спростити процедуру розрахунку та збільшити оперативність роботи, однак має недостатню точність прогнозування.

З фізичної точки зору осадження газів з атмосфери відбувається внаслідок процесу так званого міжфазового масообміну. Процес абсорбції газу рідкими аерозолями є складним й багатофакторним. Відомо декілька різних способів розв'язання цього завдання. Найбільш часто для побудови моделей використовують два способи: kinetic multilayer model for gas-particle (KM-GAP model, кінетична багатошарова модель) та molecular dynamics simulations (MD model, модель симуляції молекулярної динаміки) [9].

В роботі [10] запропонована методика прогнозування наслідків НС з викидом небезпечних газів, проведена перевірка працездатності запропонованих математичних моделей динаміки зміни концентрації небезпечних газів при їх активному осадженні. Недоліком запропонованої моделі є обмеження її працездатності газами, що є легшими відносно повітря.

Таким чином, нерозв'язаною частиною розглянутої проблеми є відсутність математичної моделі, яка адекватно описує розповсюдження важких небезпечних газів за умов їх примусового осадження.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка моделі примусового осадження дрібнодисперсними рідинними потоками небезпечних газів, з густиною більшою за повітря.

Досягнення поставленої мети передбачає розв'язання наступних завдань:

1. Описати з використанням математичного апарату дифузійне розповсю-

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

дження небезпечних важких газів у повітрі за умов паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини.

2. Перевірити працездатність розробленої моделі на прикладі викиду хлору із точкового джерела.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес формування газової хмари при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин у вигляді важких небезпечних газів та її зміна при примусовому осадженні.

Предметом дослідження є параметри газової хмари при аваріях з викидом небезпечних хімічних речовин у вигляді важких небезпечних газів.

Гіпотезою дослідження є припущення про наявність гідродинамічних рис поведінки газів із густиною більшою за густину середовища розповсюдження та наявності моделей швидкості сорбції таких газів дисперсним потоком. Така залежність дозволить підвищити точність прогнозування розмірів зони хімічного ураження в умовах активного осадження стаціонарними та мобільними пристроями.

Для побудови дифузійної моделі розповсюдження та примусового осадження важких газів в атмосфері застосовуємо метод аналітичного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з граничними умовами безперервності потоку газу з нульовою концентрацією у початковий етап часу у точці викиду та обмеженням поверхнею землі.

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

5. Математичний опис дифузійного розповсюдження важких газів за умов їх примусового осадження

Розглянемо модель умовного процесу розповсюдження хмари важкого небезпечного газу з паралельним процесом осадження (рис. 1).

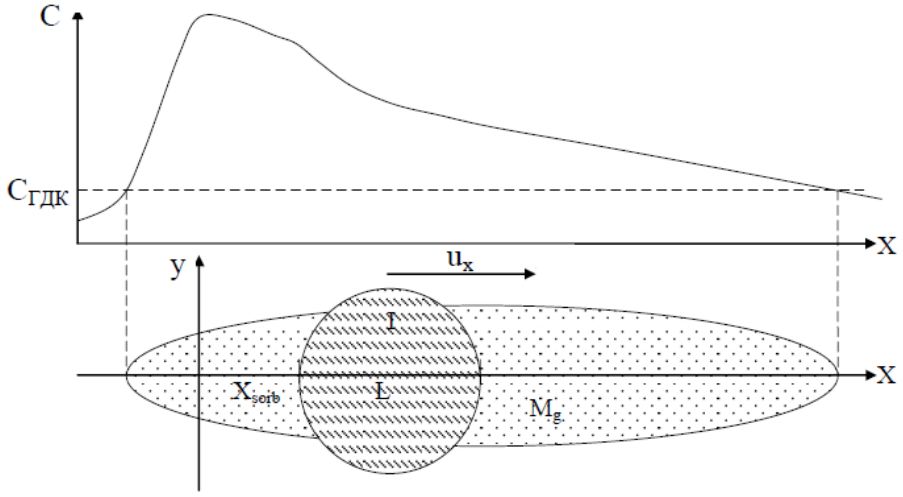


Рис. 1. Схема процесу осадження хмарі важкого газу в атмосфері

Приймемо точковий вигляд викиду газу (M_g) під тиском із технологічного апарату, в якому сталася розгерметизація. Витікання протікає з інтенсивністю q. Хмара розповсюджується за вітром із поступовим зменшенням концентрації С важкого газу. Межею хмари приймемо граничну концентрацію, яка відповідає гранично допустимій концентрації (ГДК) ($C_{ГДК}$) важкого газу. Осадження відбувається за довільною інтенсивністю I з шириною зони осадження L, яка починається на довільній відстані від точки викиду X_{sorb}.

Нехай точка початку координат співпадає з джерелом викиду важкого газу (рис. 1). Тоді розповсюдження важкого газу в повітрі внаслідок викиду описується рівнянням масопереносу [9, 10]:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(u_x C\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(u_y C\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(u_z C\right)+\sigma C=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right)+$$

$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right)+q\delta(x)\delta(y)\delta(z), \qquad (1)$$

де C(x,y,z,t) – концентрація важкого газу у точці (x,y,z) в момент часу t, кг/м^3; σ(x,y,z) – коефіцієнт, що враховує осадження важкого газу; (u_x, u_y, u_z) – вектор швидкості вітру; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії, м^2/с; q – інтенсивність викиду речовини, кг/с; δ(x) – δ-функція Дірака.

Якщо осадження важкого газу відбувається в певній тривимірній області Ω, то коефіцієнт σ може бути представлений у вигляді:

$$\sigma(x,y,z)=\begin{cases}\sigma_0, (x,y,z)\in\Omega;\\ 0, (x,y,z)\notin\Omega.\end{cases}$$

$$\sigma=\frac{V_{sorb}\cdot M_g}{\rho_g},$$

де V_{sorb} – швидкість сорбції важкого газу за певних параметрів сорбенту та атмосфери [9, 10]; M_g – молярна маса важкого газу; ρ_g – густина важкого газу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в горизонтальному напрямку можуть бути визначені як:

$$\mu_x\approx\mu_y=k_0 u,$$

де k_0 = (0,1÷1) м;

$$u=\sqrt{u_x^2+u_y^2}\,.$$

Коефіцієнт турбулентної дифузії у вертикальному напрямку залежить від стану атмосфери і описується залежністю:

$$\mu_z=k_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^m,$$

де k_1 = (0,1÷0,2) м^2/с; m ≈ 1.

Особливістю розповсюдження важкого газу є те, що його густина є більшою за густину повітря (наприклад, густина хлору (ρ_{cl} = 3,21 кг/м^3) в 2,6 рази більша за густину повітря (ρ_a = 1,23 кг/м^3) [11]). Внаслідок цього важкий газ не розсіюється вгору, а опускається донизу.

Оскільки типові швидкості руху повітряних мас (10 м/с) є значно меншими від швидкості звуку в повітрі (343 м/с), то це дозволяє вважати газове середовище

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

нестисливим. В цьому випадку рівняння Нав'є-Стокса можуть бути записані у вигляді:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_x}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_x}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_x}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{cl}}\frac{\partial P}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2}\right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_y}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_y}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_y}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{cl}}\frac{\partial P}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2}\right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_z}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_z}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}=-\frac{1}{\rho_{cl}}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right)-\frac{\rho_{cl}-\rho}{\rho_{cl}}g, \quad (4)$$

де P – відхилення тиску від величини атмосферного тиску P_0; ν – кінематична в'язкість, $м^2/с$; g – прискорення вільного падіння; ρ(x,y,z,t) – густина суміші повітря і важкого газу в заданій точці:

$$\rho = C+\rho_a\left(1-\frac{C}{\rho_{cl}}\right). \quad (5)$$

Припустимо, що вітер має постійну швидкість і напрямок (u_x = const, u_y = const), а тиск однаковий у всій області, що досліджується. Тоді рівняння Нав'є–Стокса (2)–(4) спрощуються та мають вигляд:

$$\frac{\partial u_z}{\partial t}+u_x\frac{\partial u_z}{\partial x}+u_y\frac{\partial u_z}{\partial y}+u_z\frac{\partial u_z}{\partial z}=\nu\left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2}\right)-\frac{\rho_{cl}-\rho}{\rho_{cl}}g. \quad (6)$$

Таким чином, розповсюдження важкого газу в повітрі описується системою двох диференційних рівнянь (1) та (6) з умовою (5). Початковою умовою є відсутність важкого газу в повітрі в момент початку його витікання:

$$C(x,y,z,0)=0, \quad (7)$$

а крайовою умовою на поверхні землі – її непроникність для важкого газу:

$$\frac{\partial}{\partial z}C(x,y,0,t)=0. \quad (8)$$

Отримані вирази (1)–(6) дозволяють визначати динаміку хмари важкого газу в атмосфері при її активному осадженні.

6. Перевірка працездатності розробленої моделі на прикладі викиду хлору із точкового джерела

При застосуванні аналітичного методу розв'язання моделі (1–6) виникає проблема багато каскадного інтегрування, тому нами запропоновано використати метод скінчених різниць.

Метод скінчених різниць дозволяє математично описати закономірності розповсюдження хмари важкого газу у вигляді паралелепіпеда:

$$\Omega = [a_x, b_x] \times [a_y, b_y] \times [0, b_z],$$

за межами якого концентрація небезпечного газу не буде перевищувати $C_{ГДК}$ (наприклад для важкого газу хлор $C_{ГДК}$=2 мг/м^3 [11]).

Розглянемо рівняння (1–6) у скінченному об'ємі Ω. Доповнимо умови (7) та (8) крайовими умовами 1-го роду на гранях паралелепіпеду:

$$C(a_x, y, z, t) = C(b_x, y, z, t) = 0,$$
$$C(x, a_y, z, t) = C(x, b_y, z, t) = 0,$$
$$C(x, y, b_z, t) = 0.$$

На рис. 2 побудовано тривимірну регулярну сітку в області Ω з кроком h за умови, що один з її вузлів знаходиться в точці викиду небезпечного газу (точці початку координат).

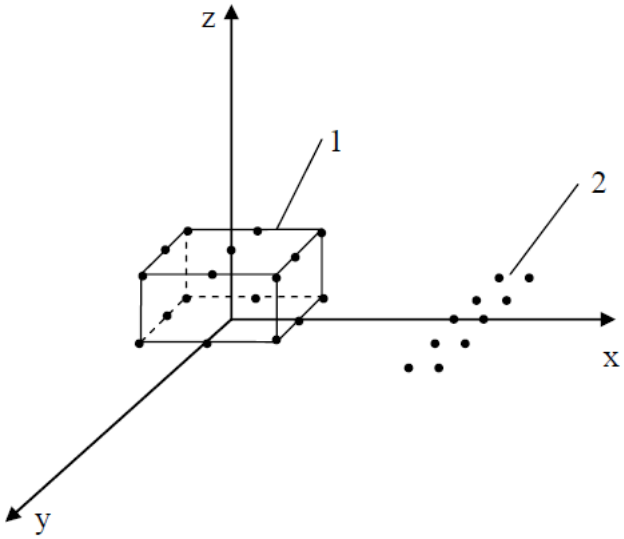


Рис. 2. Тривимірна регулярна сітка в області Ω розповсюдження небезпечного газу з кроком h (1 – паралелепіпед з точок, що є сусідніми з точкою викиду, 2 – вузли сітки, де здійснюється осадження небезпечного газу)

На рис. 2. у вузлах сітки навколо точки викиду вважаємо концентрації рівною небезпечного газу рівною $C_\infty(x, y, z)$:

$$C(x, y, z, t) = C_\infty(x, y, z).$$

У внутрішніх вузлах сітки диференційне рівняння (1) замінимо на рівняння у скінчених різницях. В точці викиду небезпечного газу й у вузлах навколо неї заміну не здійснюємо. Апроксимуємо частинні похідні наступними виразами:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C(x_i, y_j, z_k, t_{m+1}) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{\Delta t},$$

де Δt – крок вздовж вісі часу.

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

$$\frac{\partial C}{\partial x} \approx \frac{\Delta_x C}{h} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \approx \frac{\Delta_{xx} C}{h^2} = \frac{C(x_{i+1}, y_j, z_k, t_m) + C(x_{i-1}, y_j, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2},$$

$$\frac{\partial C}{\partial y} \approx \frac{\Delta_y C}{h} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \approx \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_{j+1}, z_k, t_m) + C(x_i, y_{j-1}, z_k, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2},$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} \approx \frac{\Delta_z C}{h} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) - C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h},$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \approx \frac{\Delta_{zz} C}{h^2} = \frac{C(x_i, y_j, z_{k+1}, t_m) + C(x_i, y_j, z_{k-1}, t_m) - 2C(x_i, y_j, z_k, t_m)}{h^2}.$$

Рівняння (1) у скінченних різницях отримає наступний вигляд:

$$\frac{\Delta_\tau C}{\Delta t} = a\left(\frac{\Delta_{xx} C}{h^2} + \frac{\Delta_{yy} C}{h^2} + \frac{\Delta_{zz} C}{h^2}\right) - v_x \frac{\Delta_x C}{h} - \sigma(x, y, z) C, \qquad (9)$$

З рівняння (9) видно, що збільшення в часі концентрації в точці (x_i, y_j, z_k) характеризується рівнянням:

$$\Delta_\tau C = a \frac{\Delta t}{h^2}\left(\Delta_{xx} C + \Delta_{yy} C + \Delta_{zz} C\right) - v_x \frac{\Delta t}{h} \Delta_x C - \sigma(x, y, z) C \Delta t, \qquad (10)$$

з якого можна розрахувати концентрації в точках сітки в момент часу $(t + \Delta t)$:

$$C(x_i, y_j, z_k, t + \Delta t) = C(x_i, y_j, z_k, t) + \Delta_\tau C, \qquad (11)$$

Отримані рівняння (10) та (11) дають можливість розрахувати у вузлах сітки величини концентрації небезпечного газу у будь-який момент часу t.

Для стійкого збігу процесу ітерації рівнянь (10) та (11) необхідно, щоб кроки вздовж осей часу та координат задовольняли умові Куранта-Фрідрихса-Леві:

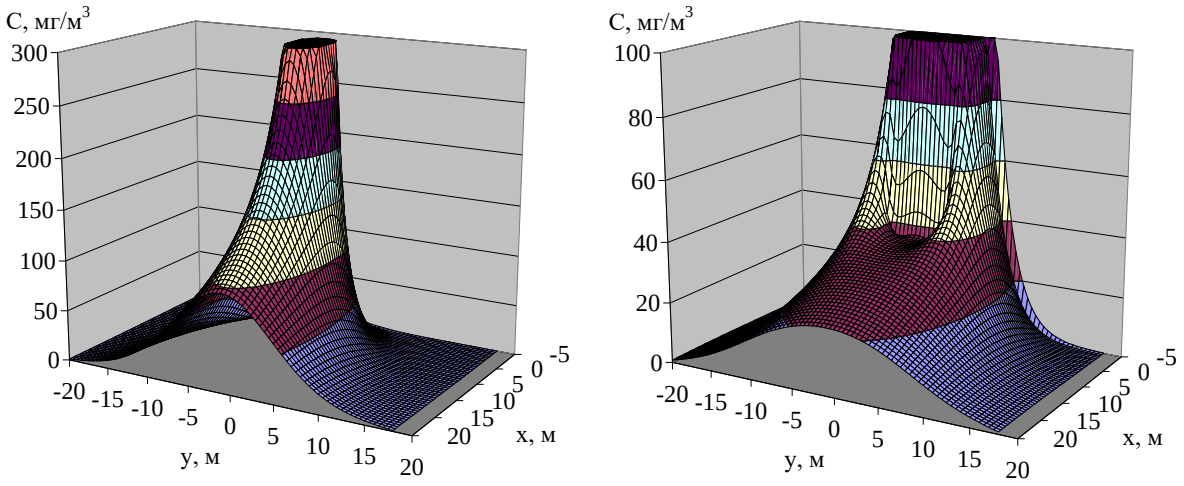
$$\Delta t \le \frac{h^2}{6a},$$

Розв’язання отриманих рівнянь здійснюється чисельно.

На рис. 3 представлено результати моделювання на прикладі небезпечного важкого газу хлор із активним його осадженням дрібнодисперсним потоком води. Приведений розподіл концентрації важкого газу хлор у просторі із активним його осадженням, що починається на відстані 10 м від точки викиду.

7. Обговорення результатів моделювання примусового осадження важких газів при їх розповсюдженні

Рівняння (1–6) є результатом розв'язання системи рівнянь Нав'є-Стокса за умов розповсюдження потоку з більшою густиною ніж середовище в якому це розповсюдження відбувається. Враховуючі, що концентрація важкого небезпечного газу зменшується від максимальної у точці викиду до нескінченно малого значення у просторі розповсюдження, то запропоновано ввести поняття межі зони розповсюдження, критерієм якою є гранично допустима концентрація небезпечного газу (рис. 1).



а) **б)**

Рис. 3. Розподіл концентрації важкого газу у просторі на прикладі газу хлору: а – без осадження; б – з активним його осадженням дрібнодисперсним потоком води

З метою урахування процесу осадження запропоновано здійснювати поетапне розбиття зони хімічного зараження, що дозволяє використовувати спрощену модель для розрахунку із додаванням інтенсивності сорбції газу на етапі його осадження. У цьому випадку місце розташування та розміри зони осадження можна вважати довільними. Це є особливо важливим для гнучкості використання теоретичних результатів для вирішення прикладних задач. Так, наприклад, у випадку розгляду ситуації із стаціонарною водяною завісою на технологічних отворах реалізується випадок вузької (0,1–0,2м) зони осадження у безпосередній близькості до осередку викиду (<3м). Однак при розгляді процесу роботи підрозділів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту з мобільними розпилюючими пристроями (пожежними стволами) ситуація протилежна – ширина зони осадження > 10м із відстанню від джерела викиду > 5м, так як робота рятувальників у безпосередньої близькості до джерела є небезпечною.

При моделюванні етапу осадження вирішальним є коефіцієнт σ, який визначається інтенсивністю сорбції важкого газу дисперсним потоком. Саме в цьому коефіцієнті враховується хімічна природа важкого газу та рідини осадження, дисперсність та інтенсивність потоку осадження та параметри середовища в якому протікає процес сорбції.

Аналітичний розв'язок рівнянь (1–6) не дав позитивного результату по причині необхідності використання багатокаскадного процесу інтегрування. Тому авторами в роботі використаний метод скінчених різниць, який дозволяє отриму-

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

вати не безперервну площину розподілу значень концентрації небезпечного газу, а розподіл вузлових точок (рис. 2). Даний метод дозволяє проводити чисельний розрахунок із використанням математичного пакету MatLab (рис. 3). Оператор може сам обирати за пріоритет або точність розрахунку збільшуючи кількість точок або оперативність розрахунку зменшуючи їх у межах виконання умов Куранта-Фрідріхса-Леві.

Результати чисельного моделювання (рис. 3) продемонстрували працездатність запропонованої моделі. За рахунок низького значення коефіцієнту дифузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Також за рахунок високої густини хлору суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору цей показник складає 0,53, тоді як для аміаку він досягає 0,95.

Представлені на рис. 3 результати демонструють можливість зменшення розміру зону ураження небезпечної хімічної речовини хлор при її осадженні водою на 38 %, тоді як за тих же умов осадження та викиду розміри хмари аміаку знижуються у 2,6 разів.

Слід відмітити, що залежності, приведені на рис. 3, побудовано у припущенні відсутності горизонтальних повітряних потоків, що при суворому розгляді не відповідає дійсності. Однак виходячи з того, за статистичними даними у більшості випадків співвідношення швидкостей горизонтальних повітряних потоків до вертикальних знаходиться у діапазоні 1:7–1:16, на наш погляд їх виключення із розрахунку є не критичним. Додатковим фактором для підтвердження цього припущення є спрямованість моделі на розрахунок динаміки розповсюдження саме важких газів.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів та перевірки адекватності отриманої моделі необхідним є проведення лабораторних експериментальних досліджень.

8. Висновки

1. Побудовано математичну модель дифузійного розповсюдження в атмосфері важких газів (небезпечних хімічних речовин із густиною більшою за атмосферне повітря) за умов паралельного протікання процесу їх примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса з відповідними граничними умовами. Особливістю побудованої моделі є врахування під час розповсюдження важкого газу процесу його примусового осадження дрібнодисперсним потоком рідини різної інтенсивності. При цьому осадження відбувається за рахунок процесів сорбції газів краплинами рідини. Модель дозволяє прогнозувати величину зоні хімічного ураження при викиді небезпечних хімічних речовин у вигляді важких газів при їх активному осадженні стаціонарними та мобільними розпилювачами.

2. Працездатність побудованої моделі перевірена на прикладі викиду небезпечного важкого газу хлор із точкового джерела. Встановлено, що розповсюдження хлору має ознаки потоку рідини й тому отримана модель є перехідним варіантом між системами моделей дифузії газів та гідродинамічними моделями потоку рідин. Врахування припущення про нестискаємість газу за рахунок значної різниці швидкостей звуку між газом, що досліджувався, та повітрям дозволило отримати спрощений вигляд перехідного режиму. Внаслідок низького значення коефіцієнту ди-

фузії хлору у повітрі за нормальних умов швидкість розповсюдження хлору на 65 % менша у порівнянні із аміаком. Також внаслідок високої густини хлору суттєво падає залежність швидкості розповсюдження небезпечної хмари від швидкості вітру. Для хлору цей показник складає 0,53, для аміаку – 0,95. Таким чином, вплив швидкості вітру на осадження хлору є набагато меншим у порівнянні з аміаком, що збільшує вагомість внеску процесу дифузії. Зменшення розміру зону ураження хлору при його осадженні водою відбувається на 38 %, тоді як за аналогічних умов викиду та осадження аміаку розміри хмари зменшуються у 2,6 разів.

Для перевірки адекватності побудованої математичної моделі та підтвердження достовірності отриманих теоретичних результатів є необхідним проведення експериментальних досліджень.

Література

1. Global Hazards Weekly Bulletin. Public Health England. London, 2024. URL: https://www.met.reading.ac.uk/~sgs02rpa/extreme.html

2. 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

3. Talhofer V., Hošková-Mayerová Š. Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information. 2019. Vol. 8(4). P. 171. doi: 10.3390/ijgi8040171

4. Leelossy A., Jr F. M., Izsak F., Havasi A., Lagzi I., Meszaros R. Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Central European Journal of Geosciences. 2014. № 6. P. 257–278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6

5. Hoinaski L., Franco D., Lisboa H. Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. Atmospheric Pollution Research. 2016. № 7. P. 134–141. doi: 10.1016/j.apr.2015.08.004

6. Tatarinov V. V., Prus U. V., Kirsanov A. A. Decision support software for chemical accident elimination management. AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2195. P. 020076. doi: 10.1063/1.5140176

7. Martínez-García M., Zhang Y., Suzuki K., Zhang Y.D. Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2021. Vol. 17(2). P. 839–848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152

8. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection. 2015. Vol. 98. P. 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005

9. Kustov M., Melnychenko A., Basmanov O., Tarasenko O. Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd. 2022. Vol. 1068. P. 239–247. doi: 10.4028/p-jdydlo

10. Melnichenko A.**,** Kustov M., Basmanov O., Tarasenko O., Bogatov O., Kravtsov M., Petrova O., Pidpala T., Karatieieva O., Shevchuk N. Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1(10(115)). P. 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675

11. Chlorine. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

***A. Lesko*[1]**, *Adjunct*
***O. Kulakov*[1]**, *PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Department*
***S. Domoleha*[2]**, *Research Officer*
[1]*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*
[2]*Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine*

MODEL OF FORCED DEPOSITION OF HEAVY DANGEROUS GASES

A model of diffusion spreading in the atmosphere of dangerous chemicals with a density greater than atmospheric air is developed. The model was created by solving the Navier-Stokes equations with appropriate boundary conditions. The peculiarity of the obtained model is the consideration of the process of forced deposition of gas by a finely dispersed liquid flow of different intensity during gas propagation. In this case, deposition occurs due to the processes of gas sorption by liquid droplets. It is established that the propagation of heavy gases in the atmosphere shows signs of fluid flow, and the resulting model is a transitional option between systems of gas diffusion models and hydrodynamic models of fluid flow. Taking into account the assumption of gas incompressibility due to the significant difference in sound speeds between the gas under study and air allowed us to obtain a simplified view of the transient regime. The modelling results for chlorine emissions from a point source showed that the effect of wind speed is much smaller compared to ammonia, which increases the importance of the contribution of the diffusion process. The resulting model allows predicting the size of the chemical damage zone in the event of accidents involving the release of heavy gases with their active deposition by stationary and mobile sprayers. In practice, water curtains at the technological openings of heavy gas storage and operation facilities can be considered as stationary sprayers. The work of rescue units at the incident site can be considered as mobile sprayers. Refinement of the results of forecasting the consequences of emergencies involving the release of hazardous gases will improve the accuracy of the design of the safety system at such facilities and help in making effective management decisions in the elimination of emergencies of this nature.

Keywords: gas density, gas sorption, forced deposition, heavy gases, forecasting the consequences of an accident, Navier-Stokes equation

References

1. Global Hazards Weekly Bulletin. Public Health England. London. (2024). Available at: https://www.met.reading.ac.uk/~sgs02rpa/extreme.html

2. 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

3. Talhofer, V., Hošková-Mayerová, Š. (2019). Method of Selecting a Decontamination Site Deployment for Chemical Accident Consequences Elimination: Application of Multi-Criterial Analysis. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(4), 171. doi: 10.3390/ijgi8040171

4. Leelossy, A., Jr, F., Izsak, F., Havasi, A., Lagzi, I., Meszaros, R. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. Central European Journal of Geosciences, 257–278. doi: 10.2478/s13533-012-0188-6

5. Hoinaski, L., Franco, D., Lisboa, H. (2016). Comparison of plume lateral dispersion coefficients schemes: Effect of averaging time. Atmospheric Pollution Research, 7, 134–141. doi: 10.1016/j.apr.2015.08.004

6. Tatarinov, V., Prus, U., Kirsanov, A. (2019). Decision support software for chemical accident elimination management. AIP Conference Proceedings, 2195, 020076. doi: 10.1063/1.5140176

7. Martínez-García, M., Zhang, Y., Suzuki, K., Zhang, Y. D. (2021). Deep Recurrent Entropy Adaptive Model for System Reliability Monitoring. IEEE

Transactions on Industrial Informatics, 17(2), 839–848. doi: 10.1109/TII.2020.3007152

8. Khan, F., Rathnayaka, S., Ahmed, S. (2015). Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. Process Safety and Environmental Protection, 98, 116–147. doi: 10.1016/j.psep.2015.07.005

9. Kustov, M., Melnychenko, A., Basmanov, O., Tarasenko, O. (2022). Modeling of gas sorption process by dispersed liquid flow. Scientific journal «Materials Science Forum» Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 1068, 239–247. doi: 10.4028/p-jdydlo

10. Melnichenko, A., Kustov, M., Basmanov, O., Tarasenko, O., Bogatov, O., Kravtsov, M., Petrova, O., Pidpala, T., Karatieieva, O., Shevchuk, N. (2022). Devising a procedure to forecast the level of chemical damage to the atmosphere during active deposition of dangerous gases. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10(115)), 31–40. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251675

11. Chlorine. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Chlorine

Надійшла до редколегії: 09.10.2024
Прийнята до друку: 15.11.2024

© А. А. Лесько, О. В. Кулаков, С. О. Домолега

УДК 623.454.38

А. А. Карпов, *ад'юнкт (ORCID 0009-0007-9895-1574)*
М. В. Кустов, *д.т.н., професор, нач. відділу (ORCID 0000-0002-6960-6399)*
О. В. Кулаков, *к.т.н., доцент, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0001-5236-1949)*
О. Є. Басманов, *д.т.н., професор, головн. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)*
Ю. В. Михайловська, *PhD, с.н.с. відділу (ORCID 0000-0003-1090-5033)*
Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

ВЗАЄМОДІЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ З ПОВЕРХНЕЮ РЕАЛЬНОЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ

Розвинуті теоретичні основи ефективного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних речовин за допомогою електромагнітного випромінювання. Проблема виявлення вибухонебезпечних речовин є надзвичайно актуальною. Розвиток нових методів, заснованих на фізичних принципах взаємодії електромагнітного випромінювання з вибухонебезпечною речовиною, є перспективним напрямком досліджень. Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини, яка враховує кут падіння хвилі та її поляризацію. При побудові моделі були розв'язані рівняння Максвелла з граничними умовами на межі розділу повітря – вибухонебезпечна речовина. В якості об'єктів дослідження розглядалися вибухонебезпечні речовини з різними електромагнітними властивостями. Для розв'язання задачі було використано чисельне моделювання. Розраховано енергетичні коефіцієнти відбиття, переломлення та поглинання електромагнітного випромінювання вибухонебезпечною речовиною. Встановлено, що наслідки взаємодії електромагнітної хвилі з вибухонебезпечною речовиною залежать від кута її падіння. Оптимальний кут падіння для більшості досліджених вибухонебезпечних речовин знаходиться в діапазоні від 60 до 75 градусів. Для вибухонебезпечної речовини з малими діелектричними втратами вплив тангенса кута діелектричних втрат на уявну частину кута переломлення є незначним. Це свідчить про те, що для таких матеріалів основним результатом взаємодії є відбиття електромагнітної хвилі. Було показано, що енергетичний коефіцієнт переломлення має локальний екстремум (максимум) в діапазоні кутів падіння від 65 до 85 градусів. Енергетичний коефіцієнт відбиття для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією збільшується зі збільшенням дійсної частини відносної діелектричної проникності за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння менших за 60 градусів.

Ключові слова: вибухонебезпечна речовина, гуманітарне розмінування, діелектричні властивості, електромагнітне випромінювання, коефіцієнт відбиття, поляризація електромагнітної хвилі

1. Вступ

Гуманітарне розмінування в Україні є однією з найбільш нагальних проблем, що виникли внаслідок вторгнення Російської Федерації в Україну. Розмінування являє собою комплексне завдання, що зачіпає не тільки гуманітарні, а й економічні та соціальні аспекти життя країни. Існує декілька аспектів актуальності ефективного розмінування. Безпека громадян – міни і боєприпаси, що не розірвалися, становлять безпосередню загрозу життю і здоров'ю людей. Випадкові вибухи призводять до загибелі і травм мирних жителів, зокрема дітей. Відновлення економіки – розмінування є одним із перших кроків на шляху до відновлення сільськогосподарських угідь, інфраструктури та промисловості. Міни роблять величезні території непридатними для використання, що завдає значної шкоди економіці країни. Повернення людей – розмінування дає змогу людям повернутися до своїх домівок і відновити нормальне життя. Безпека є однією з основних умов для цього. Гуманітарна допомога – знешкодження мін необхідне для безпечної доставки гуманітарної допомоги в постраждалі райони. Екологічна безпека – міни та вибухонебезпечні речовини (ВР) забруднюють навколишнє середовище, що може призвести до довгострокових негативних екологічних наслідків.

Масштаби розмінування в Україні величезні. Міни розкидані по великих територіях, включаючи сільськогосподарські угіддя, ліси, населені пункти. Процес розмінування є тривалим і трудомістким, що вимагає значних ресурсів і висококваліфікованих фахівців.

Гуманітарне розмінування пов'язане з низкою складнощів, а саме:

- різноманітність мін і боєприпасів – в Україні використовується велика кількість різних типів мін і боєприпасів, що ускладнює процес їх виявлення та знешкодження;
- нестабільна обстановка – бойові дії, що тривають, створюють додаткові ризики для саперів;
- нестача ресурсів – для ефективного розмінування потрібні значні фінансові ресурси, обладнання та фахівці;
- мінімізація шкоди навколишньому середовищу – під час розмінування необхідно вживати заходів для мінімізації шкоди навколишньому середовищу.

Міжнародне співтовариство надає значну допомогу Україні у вирішенні проблеми розмінування. Багато країн і міжнародних організацій надають фінансову підтримку, обладнання та фахівців.

Таким чином, відсутність можливості швидкого та безпечного очищення території України від вибухонебезпечних предметів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасні методи розмінування можна розділити на механічні, фізичні, хімічні та біологічні. До механічних методів відноситься використання спеціальної техніки для виявлення та знешкодження мін. До них належать мінні трали, роботи-сапери, металодетектори та інші механічні пристрої [1]. Фізичні методи засновані на фізичному впливі на міни для їхньої детонації або знешкодження. Наприклад, використання інших вибухових речовин, електромагнітних імпульсів або термічного впливу [2]. Достатньо рідко використовуються хімічні речовини для виявлення або знешкодження мін. Наприклад, як індикатори вибухових речовин [3]. Використання тварин (зазвичай собак або щурів) для виявлення мін за запахом відноситься до біологічних методів [4]. Кожен з перелічених методів має свої переваги й недоліки. Звичайно для поєднання переваг декількох методів існують комбіновані методи.

Тенденціями розвитку усіх методів розмінування є автоматизація та роботизація, тобто прагнення до створення повністю автономних систем розмінування, здатних працювати в небезпечних умовах без участі людини. Це дозволяє суттєво підвищити рівень безпеки процесу розмінування [5]. На теперішній час активного розвитку набули методи з використанням штучного інтелекту [6]. Розроблення алгоритмів машинного навчання для аналізу даних, отриманих із різних датчиків, та ухвалення рішень щодо класифікації об'єктів і вибору оптимальних дій дозволяють швидко обробляти великі масиви інформації. З метою зручного використання засобів виявлення та знешкодження ВР в польових умовах створюються компактні і легкі пристрої для розмінування [7]. Однак це призводить до суттєвого звуження їх функціоналу. Як видно з аналізу всі ці напрямки мають свої переваги та недоліки, тому актуальним залишається пошук нових матеріалів для створення мінних детекторів і знешкоджувальних пристроїв, а також розробка нових технологій для підвищення ефективності розмінування.

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

Основними проблемними питаннями на які слід спрямовувати увагу при розробці нових методів розмінування є розмаїття мін, які забруднюють територію України. Існує величезна кількість типів мін, що відрізняються за конструкцією, матеріалами та способами спрацьовування [8]. Це значно ускладнює процес їхнього виявлення та знешкодження. Звичайно вимоги військового використання вибухонебезпечних предметів обумовлюють максимальну скритність мін. Міни можуть бути ретельно замасковані, що ускладнює їх виявлення навіть за допомогою сучасних технологій.

Розмінування є складною і багатогранною проблемою, що вимагає комплексного підходу. Сучасні наукові дослідження дають змогу створювати дедалі ефективніші методи та технології для вирішення цього завдання [9]. Однак, незважаючи на досягнуті результати, проблема розмінування залишається актуальною і потребує подальших зусиль з боку науковців, інженерів та міжнародної спільноти.

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначених вище проблем є електромагнітні методи розмінування, які дають змогу виявляти неметалеві компоненти мін і боєприпасів, що не розірвалися [10]. Наукові дослідження в цій сфері активно розвиваються, пропонуючи нові рішення і поліпшення.

Принцип роботи електромагнітних методів виявлення та знешкодження ВР заснований на тому, що електромагнітні датчики дають змогу виявити аномалії відбитого електромагнітного випромінювання й таким чином локалізувати місце їх знаходження. Однак, ґрунтові умови, наявність металевих предметів у ґрунті, а також інші фактори можуть спотворювати результати вимірювань [11]. Аналіз сигналів, отриманих з електромагнітних датчиків, вимагає високої кваліфікації фахівців. Електромагнітні методи в основному ефективні для виявлення мін, розташованих близько до поверхні.

Електромагнітні методи розмінування відіграють важливу роль у гарантуванні безпеки персоналу та є перспективним напрямом досліджень [12]. Незважаючи на наявні обмеження, вони продовжують удосконалюватися, і в найближчому майбутньому можна очікувати на появу нових, ще більш ефективних рішень.

Основні напрямки досліджень електромагнітних методів виявлення ВР мають бути направлені на створення більш чутливих і вибіркових датчиків, здатних розрізняти об’єкти різної форми і розміру [13]. Розробка алгоритмів для ефективного опрацювання сигналів, отриманих з датчиків, і виділення корисної інформації на тлі перешкод є особливо складним питанням.

Таким чином невирішеною частиною проблеми є відсутність математичної моделі процесу взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної ВР.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Математично описати процес взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини.

2. Перевірити працездатність розробленої моделі для довільних кутів падіння електромагнітної хвилі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є діелектричні властивості вибухових речовин та їх взаємодія з електромагнітними хвилями. На відміну від попередніх досліджень [10, 14] в якості поверхні взаємодії з електромагнітними хвилями розглядається поверхня реальної ВР (ВР, у якої тангенс кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon \neq 0$). До таких небезпечних предметів відносяться безоболонкові міни та вибухонебезпечні предмети із малим вмістом металевих частин. Розглядається електромагнітна хвиля надвисокочастотного діапазону (0,1–10 ГГц) із ТЕ та ТМ-поляризацією. Предметом дослідження є процес взаємодії (проходження, поглинання, відбиття електромагнітної хвилі зі визначеними параметрами з поверхнею ВР. В якості показників взаємодії обрано коефіцієнти відбиття (R) та переломлення (Т).

Висувається гіпотеза про існування кореляції між коефіцієнтами відбиття та переломлення електромагнітної хвилі на поверхні ВР та її параметрами . Це дозволить оцінити ефективність використання електромагнітного випромінювання для дистанційного виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів.

Для побудови електродинамічної моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею ВР застосовуємо метод аналітичного розв'язання рівнянь Максвела з граничними умовами безперервності тангенціальних електричної та магнітної компонент електромагнітного поля.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми MatLab.

5. Математичний опис процесу взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини

В роботі [14] для плоскої електромагнітної хвилі, що падає з повітря під довільним кутом на ВР (рис. 1), було отримано співвідношення (8):

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}},$$

де θ_0 – кут між напрямом падіння електромагнітної хвилі на ВР (хвильовим числом k_0 електромагнітної хвилі, що падає з повітря) та нормаллю до поверхні ВР (віссю z); θ_2 – кут між напрямом електромагнітної хвилі, що пройшла всередину ВР (хвильовим числом k_2 електромагнітної хвилі, що пройшла всередину ВР) та нормаллю до поверхні ВР (віссю z); $\dot{\varepsilon} = \varepsilon \cdot [1 - i \cdot tg\delta_\varepsilon]$ – відносна діелектрична проникність ВР, що характеризує реальну ВР; ε – дійсна частина відносної діелектричної проникності реальної ВР; $tg\delta_\varepsilon$ – тангенс кута діелектричних втрат реальної ВР.

Звичайно розглядаються дві поляризації електромагнітної хвилі: горизонтальна (ТЕ-поляризація, електричне поле $\vec{E}_0$ перпендикулярне площині падіння xz (рис. 1) та вертикальна (ТМ-поляризація, електричне поле $\vec{E}_0$ лежить у площині падіння xz) [15].

В роботі [14] побудовано залежність коефіцієнту відбиття R_{TE} електромагнітної хвилі з ТЕ-поляризацією та залежність коефіцієнту відбиття R_{TM} електромагніт-

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

ної хвилі з ТМ-поляризацією від довільного кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі та відносної діелектричної проникності $\dot{\varepsilon}$ ідеальної ВР (при $tg\delta_\varepsilon=0$).

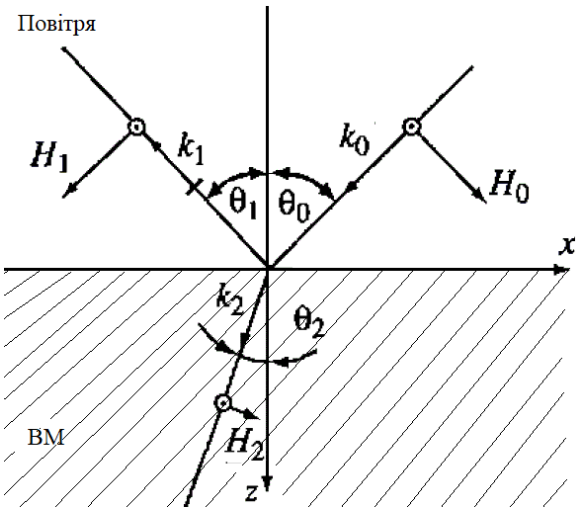


Рис. 1. Падіння електромагнітної хвилі на поверхню ВР

Не дослідженим залишився випадок падіння плоскої електромагнітної хвилі під довільним кутом на поверхню реальної ВР (ВР, у якої $tg\delta_\varepsilon\neq0$). У цьому випадку $\sin\theta_0$ є дійсною величиною (плоска електромагнітна хвиля падає з повітря), а $\sin\theta_2$ буде комплексною величиною:

$$(\sin\theta_2)=\frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon\cdot[1-i\cdot tg\delta_\varepsilon]}}, \qquad (1)$$

Виконуємо математичні перетворення:

$$(\sin\theta_2)=\frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon}\cdot\sqrt{1-i\cdot tg\delta_\varepsilon}}=\frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon}\cdot\sqrt{1+tg^2\delta_\varepsilon}}\cdot\sqrt{1+i\cdot tg\delta_\varepsilon}$$

Перейдемо від алгебраїчної форми комплексного числа до тригонометричної:

$$1+i\cdot tg\delta_\varepsilon=\sqrt{1+tg^2\delta_\varepsilon}\cdot[\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))+i\cdot\sin(arctg(tg\delta_\varepsilon))].$$

Застосовуємо формулу Муавра:

$$\sqrt{1+i\cdot tg\delta_\varepsilon}=\sqrt{\sqrt{1+tg^2\delta_\varepsilon}\cdot[\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))+i\cdot\sin(arctg(tg\delta_\varepsilon))]}=$$
$$=\sqrt[4]{1+tg^2\delta_\varepsilon}\cdot[\cos(\cos(\frac{\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))}{2})+i\cdot\sin(\frac{\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))}{2})].$$

Отримуємо:

$$(\dot{\sin}\theta_2)=\frac{\sin\theta_0}{\sqrt{\varepsilon}\cdot\sqrt[4]{1+tg^2\delta_\varepsilon}}\cdot[\cos(\cos(\frac{\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))}{2})+i\cdot\sin(\frac{\cos(arctg(tg\delta_\varepsilon))}{2}),$$

$$\dot{\theta}_2 = \mathrm{Re}[\arcsin(\theta_2)] + i \cdot \mathrm{Im}[\arcsin(\theta_2)], \quad (2)$$

Для горизонтальної поляризації (ТЕ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття $\dot{\rho}_{TE}$ та переломлення $\dot{\tau}_{TE}$ [14]):

$$\dot{\rho}_{TE} = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_2}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_2}, \quad (3)$$

$$\dot{\tau}_{TE} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}, \quad (4)$$

Для вертикальної поляризації (ТМ-поляризації) електромагнітної хвилі маємо наступні співвідношення для амплітудних коефіцієнтів відбиття $\dot{\rho}_{TM}$ та переломлення $\dot{\tau}_{TM}$ [14]):

$$\dot{\rho}_{TM} = \frac{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0 - \cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0 + \cos\theta_2}, \quad (5)$$

$$\dot{\tau}_{TM} = \frac{2 \cdot \sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_2}. \quad (6)$$

Енергетичний коефіцієнт відбиття R визначається, як відношення середнього за часом потоку відбитої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі та може бути розрахований за формулою:

$$R = |\dot{\rho}|^2. \quad (7)$$

Енергетичний коефіцієнт переломлення T визначається, як відношення середнього за часом потоку переломленої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі та може бути розрахований за формулою:

$$\dot{T} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{\tau}|^2. \quad (8)$$

Відповідно для горизонтальної поляризації (ТЕ-поляризації) електромагнітної хвилі:

$$R_{TE} = |\dot{\rho}_{TE}|^2, \quad (9)$$

$$\dot{T}_{TE} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0} |\dot{\tau}_{TE}|^2. \quad (10)$$

а для вертикальної поляризації (ТМ-поляризації) електромагнітної хвилі:

$$R_{TM} = |\dot{\rho}_{TM}|^2, \quad (11)$$

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

$$\dot{T}_{TM} = \frac{\cos\theta_2}{\sqrt{\dot{\varepsilon}} \cdot \cos\theta_0} \left|\dot{\tau}_{TM}\right|^2. \qquad (12)$$

Енергетичні коефіцієнти відбиття R_{TE} та R_{TM} є дійсними величинами.

Енергетичний коефіцієнт переломлення $\dot{T}_{TE}$ та $\dot{T}_{TM}$ для реальних ВР є комплексними величинами.

Видно, що при куті падіння $\theta_0 = 90°$ амплітудні коефіцієнти переломлення $\dot{\tau}_{TE} = 0$ та $\dot{\tau}_{TM} = 0$. У цьому випадку енергетичні коефіцієнти переломлення відповідно також $\dot{T}_{TE} = 0$ та $\dot{T}_{TM} = 0$.

6. Перевірка працездатності розробленої моделі для довільних кутів падіння хвилі

На рис. 2 побудовано залежність дійсної частини кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\mathrm{Re}\dot{\theta}_2$) від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4). Діелектричні властивості ВР приведені в таблиці 1. На рис. 3 побудовано аналогічну залежність уявної частини кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\mathrm{Im}\dot{\theta}_2$) від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі на ВР. Для розрахунків використовувалися формули (1), (2).

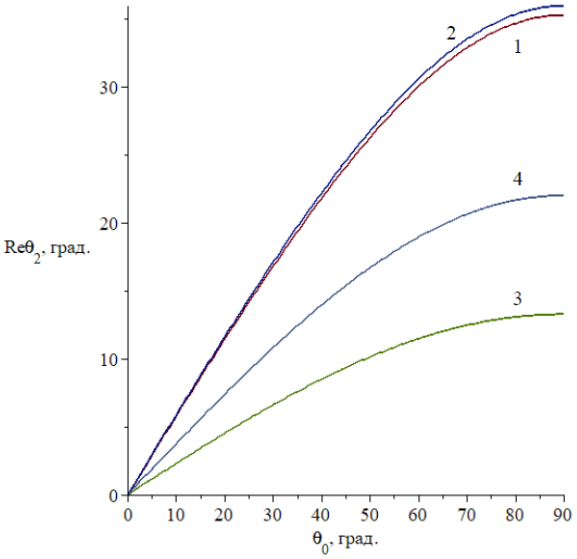


Рис. 2. Залежність $\mathrm{Re}\dot{\theta}_2$ від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

Табл. 1. Діелектричні властивості деяких ВР

№ з/п	ВР	ε	$\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$
1	Пентаеритриттетранітрат	3,0	$2\cdot10^{-2}$
2	Тринітротолуол	2,9	$3\cdot10^{-2}$
3	Нітроглицерін	19,0	$3\cdot10^{-3}$
4	Нітрат аммонію	7,1	$7\cdot10^{-2}$

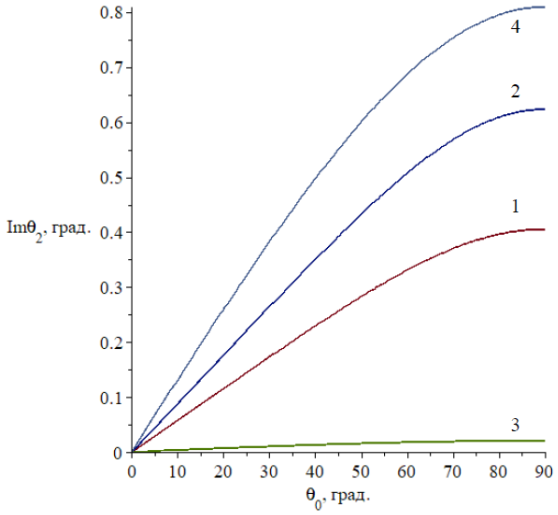


Рис. 3. Залежність $\mathrm{Im}\dot{\theta}_2$ від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

На рис. 4 по формулам (1), (3), (9) побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4). На рис. 5 по формулам (1), (5), (11) побудовано аналогічну залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією на ВР.

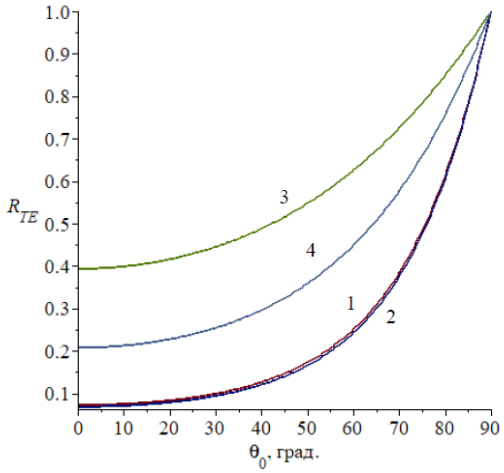


Рис. 4. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітроглицерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

На рис. 6 побудовано залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією від дійсної частини відносної діелектричної проникності ε та тангенса кута діелектричних втрат $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$ ВР при різних кута падіння θ_0 (залежність 1–θ_0=0; залежність 2–θ_0=30º; залежність 3–θ_0=60º; залежність 4–θ_0=90º).

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

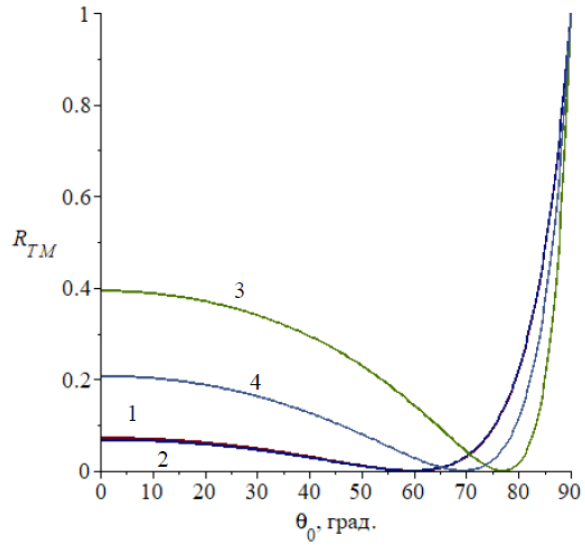


Рис. 5. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} від кута падіння θ_0 плоскої електромагнітної хвилі відповідно з горизонтальною та вертикальною поляризаціями на ВР пентаеритриттетранітрат (крива 1), тринітротолуол (крива 2), нітрогліцерін (крива 3) та нітрат амонію (крива 4)

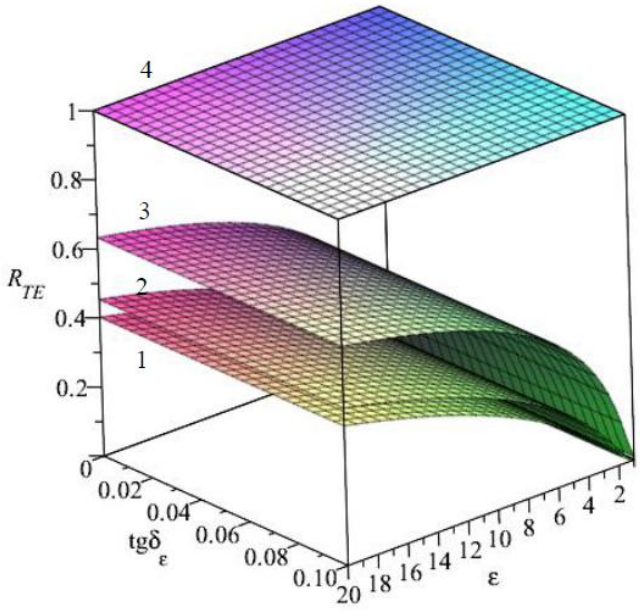


Рис. 6. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} від Ɛ та $tg\delta_\varepsilon$ при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1–θ_0=0; залежність 2–θ_0=30º; залежність 3–θ_0=60º; залежність 4–θ_0=90º) плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією

На рис. 7 побудовано аналогічну залежність для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1 – θ_0=0; залежність 2 – θ_0=30º; залежність 3 – θ_0=60º; залежність 4 – θ_0=80º).

7. Обговорення результатів дослідження взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею реальної вибухонебезпечної речовини

З рис. 2 видно, що для фіксованого значення кута падіння θ_0 зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε відбувається зменшення величини дійсної частини кута переломлення $Re\dot{\theta}_2$. Тобто пласка електромагнітна хвиля розповсюджується у ВР ближче до нормалі. Уявна частина кута

переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\mathrm{Im}\dot{\theta}_2$) для досліджених ВР (рис. 3) є незначною величиною (не перебільшує одного градусу в усьому діапазоні зміни кута падіння θ_0). З цього можна зробити припущення, що для ВР з малими діелектричними втратами вплив тангенсу кута діелектричних втрат $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$ на уявну частину кута переломлення $\dot{\theta}_2$ ($\mathrm{Im}\dot{\theta}_2$) буде незначним. З фізичної точки зору поява відмінної від нуля уявної складової $\mathrm{Im}\dot{\theta}_2$ можна пояснити поглинанням частини енергії плоскої електромагнітної хвилі в реальній ВР.

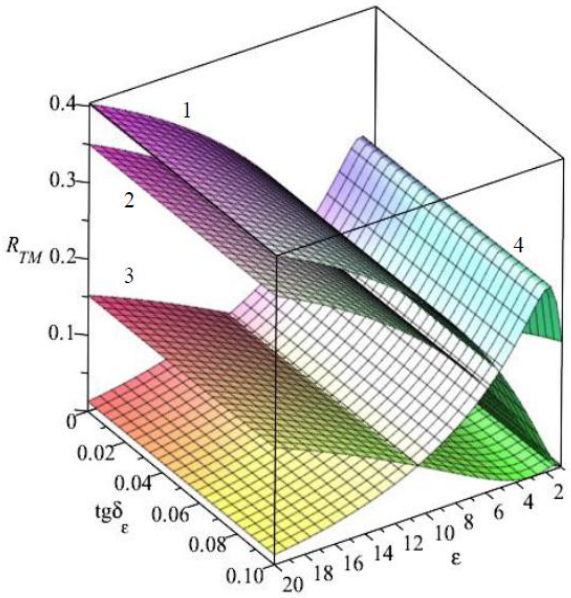


Рис. 7. Залежність енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} від Ɛ та $\mathrm{tg}\delta_\varepsilon$ при різних кутах падіння θ_0 (залежність 1–θ_0=0; залежність 2–θ_0=30°; залежність 3–θ_0=60°; залежність 4–θ_0=80°) плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією

Аналіз формул (9) та (11) показує, що енергетичні коефіцієнти відбиття R_{TE} та R_{TM} у будь-якому випадку не є комплексними величинами (наявність втрат у ВР не призводить до появи уявних частин цих коефіцієнтів). З рис. 4 та рис. 5 видно, що поляризація електромагнітної хвилі суттєво впливає на характер залежності обох енергетичних коефіцієнтів відбиття від кута падіння θ_0 електромагнітної хвилі.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TE} плавно збільшується зі збільшенням кута падіння θ_0 хвилі (рис. 4) за законом, близьким до параболічного. Мінімальне значення R_{TE} має при куті падіння θ_0=0. Тому опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху доцільно здійснювати плоскою електромагнітною хвилею з горизонтальною поляризацією нормально до поверхні ВР. Слід вважати, що при цьому максимальна кількість енергії (від 60 до 90 % для досліджених ВР) плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією переломлюється всередину ВР.

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TM} має локальний екстремум (мінімальне значення) в діапазоні кутів падіння θ_0 від 60 до 75 градусів для досліджених ВР (рис. 5). Можна припустити, що у цьому діапазоні кутів падіння практично уся енергія плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією переломлюється всередину

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

ВР. Тобто опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху плоскою електромагнітною хвилею з вертикальною поляризацією найбільш ефективне під кутами падіння від 60 до 75 градусів.

Очевидно, що для більш ефективного ініціювання підриву досліджених ВР доцільне застосування плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією з кутами опромінювання від 60 до 75 градусів (при цьому всередину ВР переломлюється найбільший відсоток енергії електромагнітних хвиль).

Аналіз формул (10) та (12) показує, що енергетичні коефіцієнти переломлення $\dot{T}_{TE}$ та $\dot{T}_{TM}$ у загальному випадку є комплексними величинами.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією дійсна частина $Re\dot{T}_{TE}$ енергетичного коефіцієнту переломлення $\dot{T}_{TE}$ має локальний екстремум (максимальне значення) в діапазоні кутів падіння θ_0 від 65 до 85 градусів для досліджених ВР. Раніше для енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією було зроблено припущення, що при близькому діапазоні кутів падіння практично уся енергія електромагнітної хвилі переломлюється всередину ВР (рис. 5). Для $Re\dot{T}_{TE}$ це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення $\dot{T}_{TE}$.

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією дійсна частина $Re\dot{T}_{TM}$ енергетичного коефіцієнту переломлення $\dot{T}_{TM}$ плавно зменшується за збільшенням кута падіння θ_0. Максимальне значення $Re\dot{T}_{TM}$ має при куті падіння θ_0=0 (при нормальному падінні електромагнітної хвилі на поверхню ВР). Вище подібна ситуація спостерігалася для енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією (рис. 4) й було зроблено припущення, що опромінення ВР з метою ініціювання її вибуху доцільно здійснювати плоскою електромагнітною хвилею з горизонтальною поляризацією при падінні нормально до поверхні ВР. Для $Re\dot{T}_{TM}$ це стверджувати неможна внаслідок комплексності величини енергетичного коефіцієнту переломлення $\dot{T}_{TM}$.

З фізичної точки зору поява уявної складової коефіцієнту переломлення має призводити до зменшення потужності електромагнітної хвили внаслідок розсіювання енергії всередині реальної ВР.

Для плоскої електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TE} для досліджених кутів падіння θ_0 зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε збільшується за законом, близьким до логарифмічного (рис. 6). Причому чим більшим є кут падіння, тим більшим є величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE}. Як й очікувалося, при куті падіння θ_0=90°, енергетичний коефіцієнт відбиття $R_{TE}=1$ в усьому діапазоні зміни дійсної частини відносної діелектричної проникності ε та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ ВР (з фізичною точки зору, плоска електромагнітна хвиля розповсюджується над ВР). Чим більшим є величина дійсної частини відносної діелектричної проникності ε, тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE}. Тобто ВР з великими значеннями ε відбивають більшу частину енергії електромагнітних хвиль, що може бути використано

для їх виявлення. Величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TE} незначно залежить від зміни величини тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ ВР при фіксованих значеннях величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε та куті падіння θ_0 в дослідженому діапазоні його зміни (від 0 до 0,1). Слід відмітити, що для більшості ВР тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ не перевищує 0,1 (табл. 1).

Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття R_{TM} зі збільшенням величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε збільшується за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння θ_0 менших за 60 градусів (рис. 7). Чим більше кут падіння, тим більшим є величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM}. Як й для електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією, тим більшим є величина дійсної частини відносної діелектричної проникності ε, тим більшим є значення енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM}. Тобто ВР з великими значеннями ε відбивають більшу частину енергії електромагнітних хвиль, що може бути використано для їх виявлення. При кутах падіння θ_0 більших 60 градусів виникає екстремум залежності R_{TM} від величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε (подібно залежності, приведеній на рис. 5). Величина енергетичного коефіцієнту відбиття R_{TM} (як й для R_{TE}) незначно залежить від зміни величини тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ ВР при фіксованих значеннях величини дійсної частини відносної діелектричної проникності ε та куті падіння θ_0 в дослідженому діапазоні його зміни (від 0 до 0,1).

Проведений аналіз дозволяє моделювати процеси взаємодії електромагнітних хвиль для широкого кола реальних умов. Проблемним питанням залишається багатошаровість вибухонебезпечних предметів, саме на вирішення цього питання необхідно спрямувати подальші дослідження.

8. Висновки

1. Побудована математична модель взаємодії електромагнітних хвиль ТМ та ТЕ поляризації з поверхнею вибухонебезпечних речовин під довільним кутом падіння, що дозволяє розраховувати енергетичні коефіцієнти відбиття та переломлення. Коефіцієнти відбиття та переломлення є критеріальними показниками при розробці механізмів виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів за допомогою опромінювання електромагнітними хвилями.

2. Проведені розрахунки за побудованими моделями підтвердили працездатність отриманих теоретичних результатів. Встановлено, що для вибухонебезпечних речовин з малими діелектричними втратами вплив тангенсу кута діелектричних втрат на уявну частину кута переломлення буде незначним. Опромінення вибухонебезпечної речовини з метою ініціювання її вибуху плоскою електромагнітною хвилею з вертикальною поляризацією буде найбільш ефективне під кутами падіння від 60 до 75 градусів. Для досліджених вибухонебезпечних речовин енергетичний коефіцієнт переломлення електромагнітної хвилі з горизонтальною поляризацією має локальний екстремум (максимальне значення) в діапазоні кутів падіння від 65 до 85 градусів. Для плоскої електромагнітної хвилі з вертикальною поляризацією енергетичний коефіцієнт відбиття зі збільшенням величини дійсної

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

частини відносної діелектричної проникності збільшується за законом, близьким до логарифмічного для кутів падіння θ_0 менших за 60 градусів. Таким чином, можна визначити межі використання методу дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів шляхом опромінення електромагнітними хвилями та мінімізувати хибні результати при аналізі сигналів відбитих хвиль.

Література

1. Furuta K., Ishikawa J. Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining. Berlin, Germany: Springer. 2009. P. 3–81. doi: 10.1007/978-1-84882-346-4_11

2. Marsh L. A., Verre W. Combining Electromagnetic Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar for the Detection of Anti-Personnel Landmines. Sensors, 2019. Vol. 19. № 15. P. 3390. doi: 10.3390/s19153390

3. Onodera T. Biochemical Sensors. 2013. P. 351. doi: 10.1201/b15650-26.

4. Prada P. A., Rodríguez M. C. Demining dogs in Colombia–A review of operational challenges, chemical perspectives, and practical implications. Science & Justice. 2016. Vol. 56(4). P. 269–277. doi: 10.1016/j.scijus.2016.03.002

5. Hemapala M. U., Huseyin C. Robots Operation in Hazardous Environment. IntechOpen. Croatia. 2017. P. 140. doi: 10.5772/65992

6. Koyama E., Hirose A. Development of Complex-Valued Self-Organizing-Map Landmine Visualization System Equipped with Moving One-Dimensional Array Antenna. IEICE Transactions on Electronics. 2018. Vol. 101(1). P. 35. doi: 10.1587/transele.E101.C.35

7. Ekenberg L., Fasth T., Larsson A. Hazards and quality control in humanitarian demining. International Journal of Quality & Reliability Management. 2018. Vol. 35. № 4. P. 897–913. doi:10.1108/IJQRM-01-2016-0012

8. Müller C., Scharmach M., Gaal M., Guelle D., Lewis A., Sieber A. Performance demonstration for humanitarian demining: Test and evaluation of mine searching equipment in detecting mines. Materials Testing. 2003. Vol. 45(11–12). P. 504–512. doi: 10.1515/mt-2003-0004

9. Mikulic D., Mikulic D. Design of demining machines. Springer London. 2013. P. 73–152. doi: 10.1007/978-1-4471-4504-2_5

10. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України. 2023. № 1(37). С. 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

11. Salam A., Raza U., Salam A., Raza U. Electromagnetic characteristics of the soil. Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things. 2020. P. 39–59. doi: 10.1007/978-3-030-50861-6_2

12. Krivtsun V., Nanivska L. Factors affecting the demining process. Social Development and Security. 2023. Vol. 13(5). P. 38–44. doi: 10.33445/sds.2023.13.5.5

13. Lee J. S., Yu J. D. Non-destructive method for evaluating grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. Journal of Nondestructive Evaluation. 2019. Vol. 38. P. 1–15. doi: 10.1007/s10921-019-0582-9

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. Zhou Q., Yao X., Hu J. Study on the propagation characteristic of electro-

magnetic wave based on WUSN. Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 2021. Vol. 35(13). P. 1708–1718. doi: 10.1080/09205071.2021.1915882

A. Karpov, *Adjunct*
M. Kustov, *DSc, Professor, Head of the Scientific Department*
O. Kulakov, *PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the Scientific Department*
O. Basmanov, *DSc, Professor, Chief Researcher of the Scientific Department*
Yu. Mykhailovska, *PhD, Senior Researcher of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

INTERACTION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE WITH THE SURFACE OF A REAL EXPLOSIVE SUBSTANCE

To develop the theoretical basis for the effective detection and neutralization of explosive substances using electromagnetic radiation. The problem of detecting explosives is extremely relevant in the modern world. The development of new methods based on the physical principles of the interaction of electromagnetic radiation with matter is a promising area of research. An electrodynamic model of the interaction of an electromagnetic wave with the surface of a VR has been developed. The model takes into account an arbitrary angle of incidence of the wave and two main polarizations – TM and TE. Maxwell's equations with the corresponding boundary conditions at the interface between two media (air – explosive substance) were used to solve the electrodynamics problems. Different types of explosive substances with different dielectric properties were considered as objects of study. To solve the problem, numerical modeling based on the finite difference method was used. The modeling allowed us to calculate the energy coefficients of reflection, refraction, and absorption of electromagnetic radiation by the explosives. It was found that the efficiency of interaction of an electromagnetic wave with a radiation source significantly depends on the angle of its incidence. The optimal incidence angle for most of the studied radiation sources is in the range of 60 to 75 degrees. For the VRs with low dielectric losses, the influence of the dielectric loss tangent on the imaginary part of the refractive angle is insignificant. This indicates that for such materials the main mechanism of interaction is the reflection of an electromagnetic wave. It has been shown that the energy refractive index has a local extreme (maximum) in the range of incident angles from 65 to 85 degrees. The energy reflection coefficient for a plane electromagnetic wave with vertical polarization increases with the increase of the real part of the relative permittivity according to a law close to the logarithmic law for incident angles less than 60 degrees.

Keywords: dielectric properties, electromagnetic radiation, explosive substance, humanitarian demining, reflection coefficient, wave polarization

References

1. Furuta, K., Ishikawa, J. (2009). Anti-personnel landmine detection for humanitarian demining. Berlin, Germany: Springer, 3–81. doi: 10.1007/978-1-84882-346-4_11

2. Marsh, L. A., Verre, W. (2019). Combining Electromagnetic Spectroscopy and Ground-Penetrating Radar for the Detection of Anti-Personnel Landmines. Sensors, 19, 15, 3390. doi: 10.3390/s19153390

3. Onodera, T. (2013). Biochemical Sensors, 351. doi: 10.1201/b15650-26

4. Prada, P. A., Rodríguez, M. C. (2016). Demining dogs in Colombia–A review of operational challenges, chemical perspectives, and practical implications. Science & Justice, 56(4), 269–277. doi: 10.1016/j.scijus.2016.03.002

5. Hemapala, M., Huseyin, C. (2017). Robots Operation in Hazardous Environment. IntechOpen. Croatia, 140. doi: 10.5772/65992

6. Koyama, E., Hirose, A. (2018). Development of Complex-Valued Self-Organizing-Map Landmine Visualization System Equipped with Moving One-Dimensional Array Antenna. IEICE Transactions on Electronics, 101(1), 35. doi: 10.1587/transele.E101.C.35

© А. А. Карпов, М. В. Кустов, О. В. Кулаков, О. Є. Басманов та ін.

7. Ekenberg, L., Fasth, T., Larsson, A. (2018). Hazards and quality control in humanitarian demining. International Journal of Quality & Reliability Management, 35, 4, 897–913. doi:10.1108/IJQRM-01-2016-0012

8. Müller, C., Scharmach, M., Gaal, M., Guelle, D., Lewis, A., Sieber, A. (2003). Performance demonstration for humanitarian demining: Test and evaluation of mine searching equipment in detecting mines. Materials Testing, 45(11–12), 504–512. doi: 10.1515/mt-2003-0004

9. Mikulic, D., Mikulic, D. (2013). Design of demining machines. Springer London, 73–152. doi: 10.1007/978-1-4471-4504-2_5

10. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Naukovyi zhurnal, Kharkiv: NUCZU, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

11. Salam, A., Raza, U., Salam, A., Raza, U. (2020). Electromagnetic characteristics of the soil. Signals in the Soil: Developments in Internet of Underground Things, 39–59. doi: 10.1007/978-3-030-50861-6_2

12. Krivtsun, V., Nanivska, L. (2023). Factors affecting the demining process. Social Development and Security, 13(5), 38–44. doi: 10.33445/sds.2023.13.5.5

13. Lee, J. S., Yu, J. D. (2019). Non-destructive method for evaluating grouted ratio of soil nail using electromagnetic wave. Journal of Nondestructive Evaluation, 38, 1–15. doi: 10.1007/s10921-019-0582-9

14. Kustov, M., Kulakov, O., Karpov, A., Basmanov, O., Mykhailovska, Yu. (2024). Elektrodynamichna model vzaiemodii elektromahnitnoi khvyli z poverkhneiu vybukhonebezpechnoi rechovyny. Problemy nadzvychainykh sytuatsii: Naukovyi zhurnal, Kharkiv: NUCZU, 1(39), 81–95. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-6

15. Zhou, Q., Yao, X., Hu, J. (2021). Study on the propagation characteristic of electromagnetic wave based on WUSN. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 35(13), 1708–1718. doi: 10.1080/09205071.2021.1915882

Надійшла до редколегії: 12.10.2024
Прийнята до друку: 11.11.2024

UDC 614.8

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)*
A. Sharshanov, *DSc, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-9115-3453)*
Y. Goncharenko, *PhD, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-1766-3244)*
S. Shcherbak, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0003-1133-0120)*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

SILICOPHOSPHATE FIREPROOF COMPOSITION FOR BUILDING FINISHING MATERIALS

The composition of silicophosphate composition based on liquid glass for fire protection of building finishing materials has been developed. The compositions were prepared by mixing aqueous solutions of liquid glass and acetic acid with the addition of phosphate buffer solutions with a pH of 6–8. The phase composition of the experimental compositions was investigated by infrared spectroscopy and the formation of Si–O–P bonds was established, which indicates the incorporation of phosphate ions into the siloxane framework of polysilicic acid gels. It was established that the polycondensation mechanism is influenced by the pH value of the phosphate buffer solution, as well as its content. The use of a buffer solution with a pH of 6 leads to the initialization of mainly net polycondensation in liquid glass sols. Increasing the pH to 7–8 ensures linear polycondensation of polysilicic acid, which increases the homogeneity of the gel coating, provides elasticity, and increases its fire-retardant effect. Conducted fire tests showed that the best fire-resistant properties have systems with a buffer solution content of 20–25 % with a pH of 7, which provide maximum resistance to fire and minimal loss of mass of samples during exposure to high temperatures. For such compositions, the 1st group of flame retardant efficiency is established, and the treatment of wood samples with them allows the material to be transferred to the "high-flammability" group. Extruded polystyrene samples covered with the developed compositions do not burn, the absence of burning drops is noted. The obtained results emphasize the prospects for the further development of such systems for the protection of building materials.

Keywords: silica, fire-resistant coatings, phosphate buffers, building materials, heat resistance, fire resistance, wood, expanded polystyrene

1. Introduction

Despite the development of technologies and the constant improvement of safety measures, fires remain one of the most critical threats to human life and health. Public and residential buildings, where finishing and insulating building materials are used, are especially vulnerable. Among them, wood and extruded polystyrene foam have significant consumer demand, the fire safety of which, due to the high level of flammability, requires a careful approach to preventive measures.

A very effective passive fire protection mode is aimed at ensuring the ability of structures to resist fire for as long as possible and increasing the time for evacuation of people and the arrival of fire brigades. The priority direction of this type of protection is the use of fire-retardant coatings and technologies that reduce the flammability of combustible materials.

Silica-based coatings have proven themselves as an effective fire protection agent, which, due to their ability to form a protective layer when heated, reduce the risk of ignition and slow down the process of fire spread. In addition, silica-containing coatings provide additional mechanical strength of materials, stably retain their fire-retardant properties for a long time and are environmentally safe.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

It is known that modification often plays a decisive role in improving the properties of materials or systems. By changing certain parameters, structure or composition, it is possible to achieve optimal characteristics, such as increased resistance, strength, stability or functionality. To increase the fire-retardant efficiency of silica-containing coatings, it is advisable to add special components that would contribute to the formation of compositions that can withstand higher temperatures and form a more stable protective layer. A good option for such modifying additives can be phosphorus-containing flame retardants, which will be a prerequisite for the formation of heat-resistant silico-phosphate bonds. The number of such compounds is quite large, which allows you to choose a component whose properties would best meet the given conditions. On the other hand, the task of choosing is not simple, since it is necessary to take into account a number of factors on which the effectiveness, safety and cost-effectiveness of the fire-retardant coating depend.

Thus, it is relevant to search for the optimal composition of the composition based on silicon and phosphorus compounds, which will allow combining the advantages of both elements for effective fire protection of building materials.

2. Analysis of literary data and formulation of the problem

The use of phosphorus-containing flame retardants as effective means for increasing the fire resistance of materials is widely studied in the scientific literature. Such substances are becoming widespread as an environmentally safe alternative to toxic halogen flame retardants. Another advantage of their use in the field of fire safety is the ability to exhibit fire-fighting properties in both the gas and condensed phases during the combustion process. This characteristic makes phosphorus-containing substances universal and effective fire-retardant agents. In the condensed phase, phosphorus compounds contribute to the formation of a protective carbon layer that prevents the access of oxygen and the spread of fire. In the gas phase, these flame retardants decompose under the influence of high temperatures with the release of phosphorus-containing groups that are able to capture active radicals H• and HO•, catalyzing dehydration processes [1].

Recently, organic phosphorus-containing substances have been considered promising flame retardants. The use of 9.10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) and its derivatives has attracted particular attention. In particular, in [2] it was shown that these flame retardants are able to trap oxygen radicals, acting as flame inhibitors and slowing down the transfer of heat to the polymer matrix. There are also a number of studies devoted to the study of the flame retardant behavior of systems created on the basis of combinations of DOPO and nitrogen-containing compounds. The authors of [3], for example, used a phosphorus-nitrogen flame retardant (CN-DOPO) by adding carbon nitride. The synergistic flame retardant mechanism of the resulting composite was confirmed by the increase in the limiting oxygen index and the formation of a dense protective carbon layer. High fire retardant performance was also obtained for a composition based on DOPO and melamine [4], but all of these flame retardants decompose into toxic components during operation that are harmful to the environment.

A separate group of organic phosphorus-containing flame retardants are phosphoric acid esters, for example, tris (2-butoxyethyl)phosphate (TBOEP) [5], tris (3,5-xylenyl)phosphate (TXP) or trimethylphosphate (TMP) [6]. Despite the excellent fire-fighting ability of these compounds, they are usually not chemically bound to the polymer matrix and can be released into the environment through evaporation, leaching, and mechanical friction, and worsen the ecological situation.

The results of the above works [2–6] are of great theoretical and practical importance, but the safety of organic phosphorus-containing compounds for the environment and human health is questionable. First of all, these substances are potential pollutants of aquatic ecosystems. The work [7] provides data confirming the ability of organophosphorus compounds to bioaccumulate in living organisms directly or, spreading over time through the trophic levels of the food chain. The results of some studies even indicate the negative impact of these flame retardants on molecular processes in cells, in particular on gene transcription, protein synthesis and energy metabolism [8].

Inorganic phosphorus-containing flame retardants are considered to be much more environmentally friendly than their organic counterparts, as they are not characterized by the release of toxic products during thermal decomposition. Numerous studies have focused on studying the flame retardant properties of compositions based on ammonium phosphates. Despite the relevance and value of these studies, it should be taken into account that inorganic flame retardants may be less effective at low concentrations, i.e., to achieve a high level of fire protection, a larger amount of additive may be required compared to organic phosphorus-containing compounds. In addition, some inorganic flame retardants are hygroscopic, which may lead to a decrease in their effectiveness or deterioration of properties during operation in conditions of high humidity.

The disadvantages of individual flame retardants can be minimized by using combined systems. There are a number of works devoted to the study of the synergistic flame retardant action of silicon and phosphorus compounds [9]. The results of the studies confirm the improvement of the fire-retardant properties of such compositions. In particular, silicon can improve the stability and structural integrity of the carbonized layer, the formation of which is facilitated by phosphorus-containing substances.

Such synergism of the two elements is the basis for ensuring more reliable protection of polymeric materials from thermal destruction in the event of a fire. In addition, it is known about the ability of phosphate groups to be incorporated into the siloxane framework, which increases its resistance to adverse climatic factors. Previously conducted studies focused on studying the effect of orthophosphate acid on the properties of silica-containing fire-retardant coatings [10]. The survivability indicators of the sols were satisfactory for high-quality application of the compositions to the surface of the materials. It was also previously established that buffer systems play a key role in obtaining high-fluidity sols [11]. In view of this, it would be advisable to consider phosphate buffer solutions as modifying additives in the composition of silica-containing compositions and to evaluate the fire-retardant efficiency of coatings based on them.

3. Purpose and objectives of the study

The purpose of the work is to study the influence of phosphate buffer solutions on the formation of the structure and fire-retardant properties of SiO_2-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 phosphate buffer solutions and the gelation processes in them;

– to evaluate the effectiveness of the fire-retardant silicophosphate coating by conducting fire tests on wood samples and extruded polystyrene foam.

4. Materials and research methods

The object of research is the fire protection of wooden and polystyrene foam finishing materials.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

The subject of research is the processes of transformation of fire-retardant coatings during the action of fire.

The main hypothesis of the research is the possibility of embedding phosphate ions into the siloxane framework of the fire-retardant composition, which leads to an increase in the fire resistance of silica coatings.

Solutions of liquid glass and acetic acid were mixed using a magnetic stirrer. The obtained silicic acid sols were modified with a phosphate buffer solution prepared on the basis of sodium salts. The pH of the buffer solution (6, 7, 8) and its content (15, 20, 25 %) were varied.

Heat treatment of silica gels was carried out at 800 °C in an oxidizing environment (air), maintaining at a maximum temperature of 2 h (temperature rise rate 4–5 °C/min).

Wood samples (9x6x3 cm) were pre-dried in a drying oven at 100 °C to constant weight. Samples of extruded polystyrene foam brand XPS with a size of 5x5x3 cm were used. The resulting gel compositions were applied to the surface of the experimental samples by the bath method. The application of 2–3 layers of coating was carried out after drying the previous layer at 80 °C in a drying oven. Additionally, a 20 % aqueous solution of diammonium hydrogen phosphate was sprayed onto the surface of the dried samples and also dried.

The change in the optical density of the sols over time was determined using a KFK-2 photocolorimeter using a cuvette with l = 5 cm at a wavelength of 490 nm. Distilled water was taken as a reference solution.

Infrared absorption spectra of raw and heat-treated gels 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/Labs software were used to analyze the spectra. The fire-retardant efficiency group of coatings on the surface of wood was determined according to DSTU 4479:2005 [12], the flammability group was determined 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 as a percentage.

5. The effect of phosphate buffer solution on gelation processes in experimental sols

The dependences of the change in optical density over time for silicic acid sols with different volume fractions of phosphate buffer solution were identical; the curves practically overlapped each other.

Compared with systems with orthophosphoric acid additives, which were studied earlier [10], sols modified with phosphate buffer solutions retained fluidity for a longer time.

The latent coagulation time was determined by the change in optical density in the sols: the tangents to the curves showed a decrease in the tangent of the slope of these curves, which indicates a decrease in the rate of change of this parameter.

Fig. 1 presents the dependences of the latent coagulation time and sol viability on the buffer solution content.

The lowest latent coagulation time was observed for sols with buffer solution additives pH 6, and an increase in this parameter with increasing buffer solution content was also noted. For compositions with pH 7 and 8, this characteristic was at the same level.

For all the studied compositions, the viability of the sols was high (on average 2 h) and was satisfactory for high-quality application to the surface of the material and the formation of a homogeneous coating. It can be assumed that the phosphate buffer solu-

tion enhances the effect of the acetate solution, which is formed when mixing acetic acid and liquid glass. In this case, the viability of the sols increases compared to compositions without additives. The directly proportional relationship between the content of buffer solutions and the solidification time of the sols can be explained by the effect of dilution.

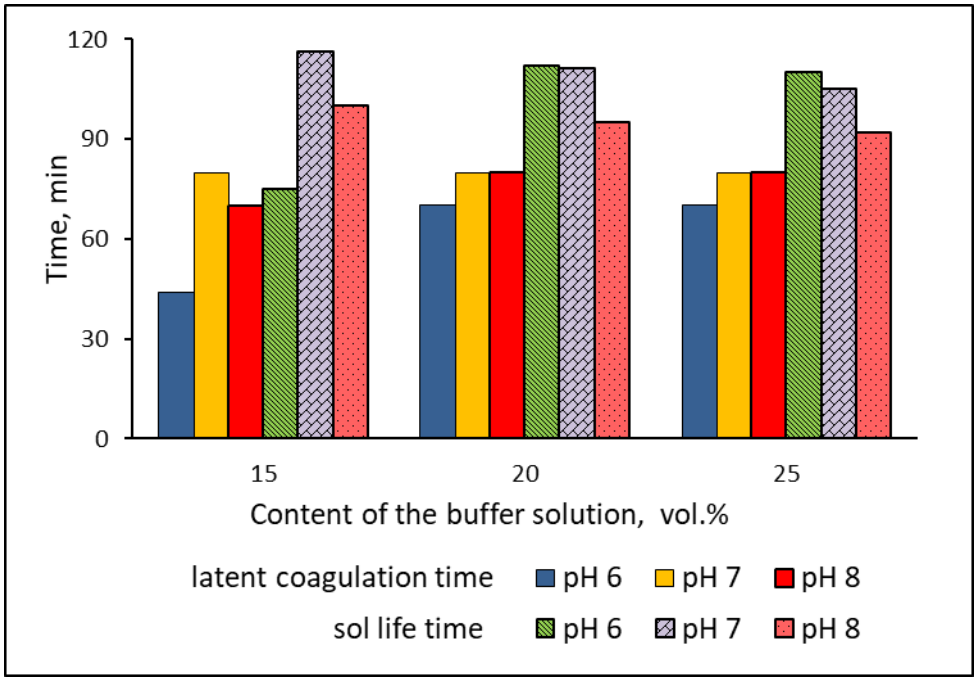


Fig. 1. Dependence of latent coagulation time and sol viability on the buffer solution content

Fig. 2 shows the infrared spectra of raw silica gels. For systems modified with phosphate buffer solutions with different pH and different contents, the spectra have an almost identical set of characteristic vibration bands.

All spectra have a broad absorption band in the range of 2800–3600 cm^{-1}, which characterizes the stretching vibrations of the O–H bonds. Deformation vibrations of hydroxyl groups are marked by peaks at 1410, 1540 and 1635 cm^{-1}. The effect of the buffer solution content on the intensity of these bands was not observed.

The stretching vibrations of the Si–O–Si bonds correspond to clearly pronounced absorption bands at 790, 1050 cm^{-1}, the deformation ≡Si–OH – at 970 cm^{-1}. The intensity of the band at 1050 cm^{-1} for the modified gels was somewhat higher compared to the pure sample. The absorption bands in the range of 400–460 cm^{-1}, which correspond to the deformation rotational vibrations of Si–O [4–7], are also more intense in the spectra of the gel with additives. The set of absorption bands of the vibrations of the Si–O,≡Si–OH, O–H bonds indicates the presence of polysilicic acid in the gel.

In the range of 650–800 cm^{-1}, vibrations of the P–O bonds were recorded, and in the range of 500–530 cm^{-1}, vibrations of the bonds in orthophosphate ions were observed. The asymmetric vibration of the P=O bond in the IR spectrum was recorded in the range of 1115–1300 cm^{-1} [4–7].

For the spectra of the gel with the addition of phosphate buffer solution, absorption bands were recorded at 2320 and 2360 cm^{-1}, which may correspond to vibrations of the P–H bonds.

The authors of [8] noted that the band at 1540 cm^{-1} may be characteristic of acetate, namely, it corresponds to vibrations of the C=O bond. In [8], it was also noted that the maximum at 1129 cm^{-1} corresponds to vibrations of the Si–O–P bonds.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

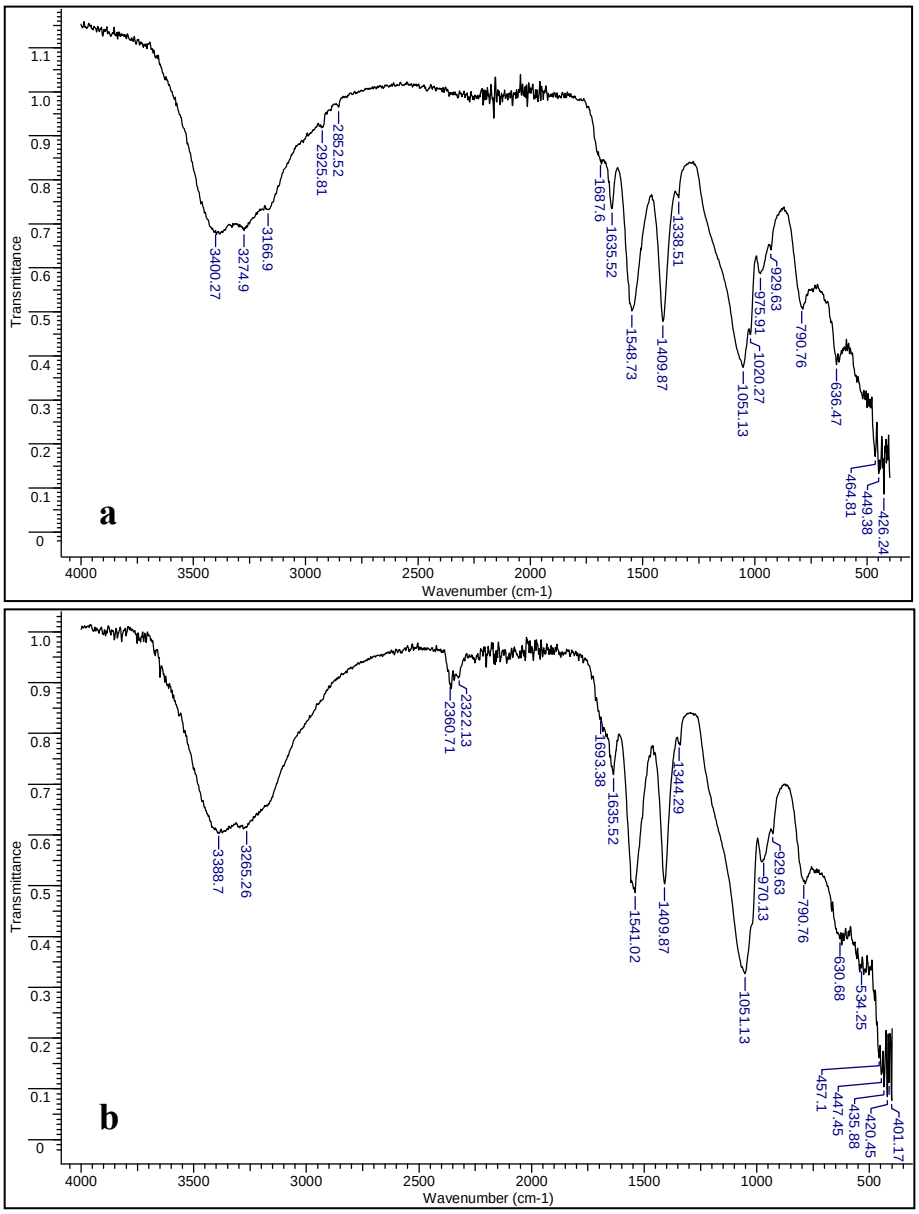


Fig. 2. IR spectra of raw SiO_2 gels: unmodified (a) and with 20 % phosphate buffer solution with pH 6 (b)

Given this, it can be assumed that Si–O–P bonds are present in the experimental samples, that is, phosphate ions are incorporated into the siloxane framework of the gel coating.

6. Results of determining the fire-retardant efficiency of silicophosphate coating on wooden samples

Tab. 1 shows the results of determining the fire protection efficiency group of the coating and the flammability class for wood samples.

The best results were obtained for coatings based on compositions with a 25 % content of phosphate buffer solution with pH 7 (the mass loss of samples is 6.2–7.9 %).

It is worth noting that the effectiveness of a fire-retardant coating depends not only on the acidity of the composition, but also on the number of its applied layers.

The addition of a phosphate buffer solution with an acidity of 6 makes it possible to significantly reduce mass loss during fire tests (Fig. 3): increasing the content to 20 % halves the mass loss under the conditions of using a single-layer coating.

Tab. 1. Results of studies on determining the fire protection efficiency group and the flammability class for wood samples

pH of buffer solution	Volume fraction of buffer solution, %	Number of coating layers	Sample mass loss (120 s), %	Coating fire protection efficiency group	Δt_{max}, °C	Time to reach maximum temperature, c	Sample mass loss during the time until reaching the maximum temperature, %	Combustibility
Untreated sample			26.4	-	118	30	5,1	flammable, combustible
6	15	1	12.7	II	92	560	57	combustible, highly flammable
		2	10.1	II	45	300	20	highly flammable
		3	9.1	II	91	430	33,5	combustible, highly flammable
	20	1	7.5	I	73	480	30,9	
		2	7.7	I	92	590	30	
		3	10.5	II	100	310	31,2	
	25	1	6.8	I	56	300	16,8	highly flammable
		2	10,2	II	90	600	55,8	combustible, highly flammable
		3	12	II	82	180	17,9	combustible, medium flammability
7	15	1	8.8	I	38	300	21,5	highly flammable
		2	8.9	I	90	620	54	combustible, highly flammable
		3	8.9	I	72	540	46	
	20	1	8.2	I	65	340	26,4	
		2	8.8	I	103	600	51,2	
		3	9.3	II	90	590	52,2	
	25	1	7.9	I	70	250	19,9	
		2	8.8	I	45	300	21,5	hardly flammable
		3	6.2	I	93	370	28,9	combustible, highly flammable

In the case of applying a two-layer coating at the point of 20 % phosphate buffer solution with pH 6, a decrease in mass loss is also observed (from 10 to 8 %). In the case of applying a three-layer coating, mass loss increases with increasing buffer solution content. This is consistent with the assumption of the influence of the quality of coating application and the accumulation of micro-inhomogeneities in the coating, which leads to the formation of cracks and an increase in mass loss of samples.

In the case of using a buffer solution with pH 7: the mass loss of the samples after 2 min of testing is less than 9 %, and increasing the buffer solution content to 25 % leads to a further decrease in mass loss.

The obtained data also confirm the fact that the resistance of the coating to fire is also affected by the amount of water used to prepare the composition and after gel formation may be in the interglobule space of the coating. Water evaporates, cooling the surface of the material, therefore, for a single-layer coating in the first minutes of fire exposure, mass loss is minimal (Fig. 4).

After the water evaporates, the cooling effect no longer occurs, so an increase in mass loss is observed.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

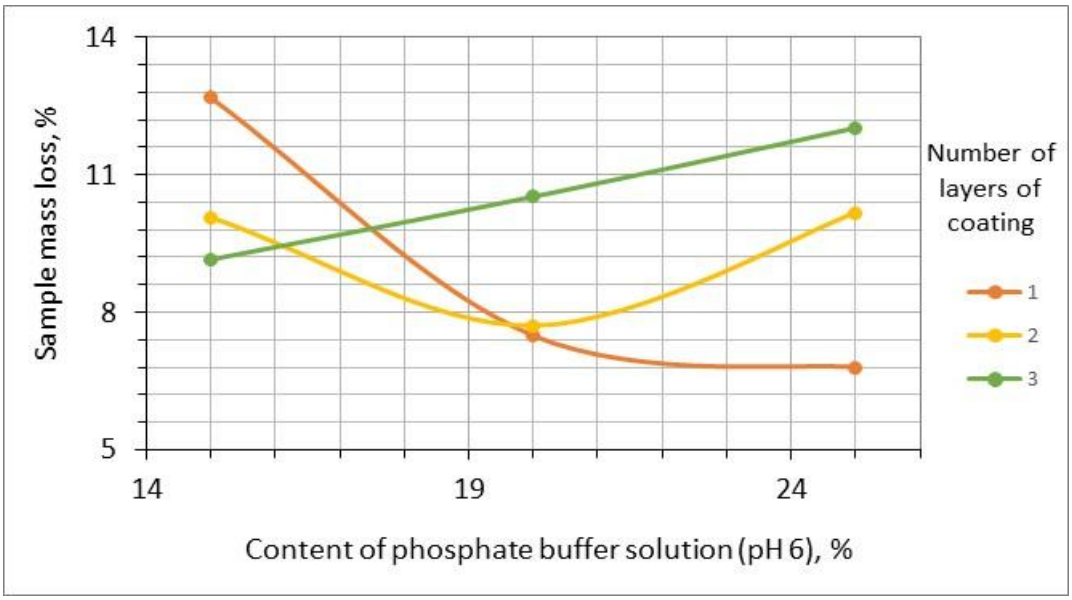


Fig. 3. Effect of the content of phosphate buffer solution with pH 6 on the mass loss of samples during fire tests for 2 min

This conclusion is confirmed by the results shown in Fig. 4 (b): the three-layer coating is less homogeneous, so some water can remain in the lower layers of the coating and gradually, over time, evaporate, and cooling the coating surface.

7. Effect of phosphate buffer solutions on the fire protection of extruded polystyrene foam

Extruded polystyrene foam is widely used for thermal insulation of buildings, because it has a much lower price than expanded polystyrene. But, despite the fact that the composition of extruded polystyrene foam contains flame retardants (as indicated in the certificate), under the influence of fire, active combustion is observed within 3 s. During combustion, the foam melts flows down in burning drops, sticks to cold surfaces, continuing to burn.

Compositions containing phosphate buffer solutions were used to apply a fire-retardant coating to extruded polystyrene foam. Tab. 2 shows the results of fire tests for samples of extruded polystyrene foam.

One of the main advantages of using a fire-retardant coating of the studied composition is the prevention of the formation of burning drops during the combustion of extruded polystyrene foam. The use of a phosphate buffer solution with a pH of 8 allowed increasing the ignition time of the sample to 5–6 s, which was almost twice as high as the corresponding parameter for untreated XPS. At the same time, the combustion process proceeded slowly and without sticking to the metal surface of the installation.

Modifying the silicic acid sols by buffer solutions with a pH of 6–7 significantly increased the fire resistance of the foam – combustion began after 7–8 s, the samples did not support combustion or did not ignite at all. Mass losses ranged from 0–1.95 % depending on the number of layers of the applied coating and the pH of the solution.

Examination of the surface of the samples under a microscope after testing showed the absence of cracks, i.e. shrinkage of the samples occurred without peeling of the coating (Fig. 5).

The best performance indicators of the fire-retardant coating were demonstrated by compositions with a 20 % phosphate buffer solution content with pH 6 and 7: during the action of fire, the samples did not ignite, their volume decreased, but the mass was stable.

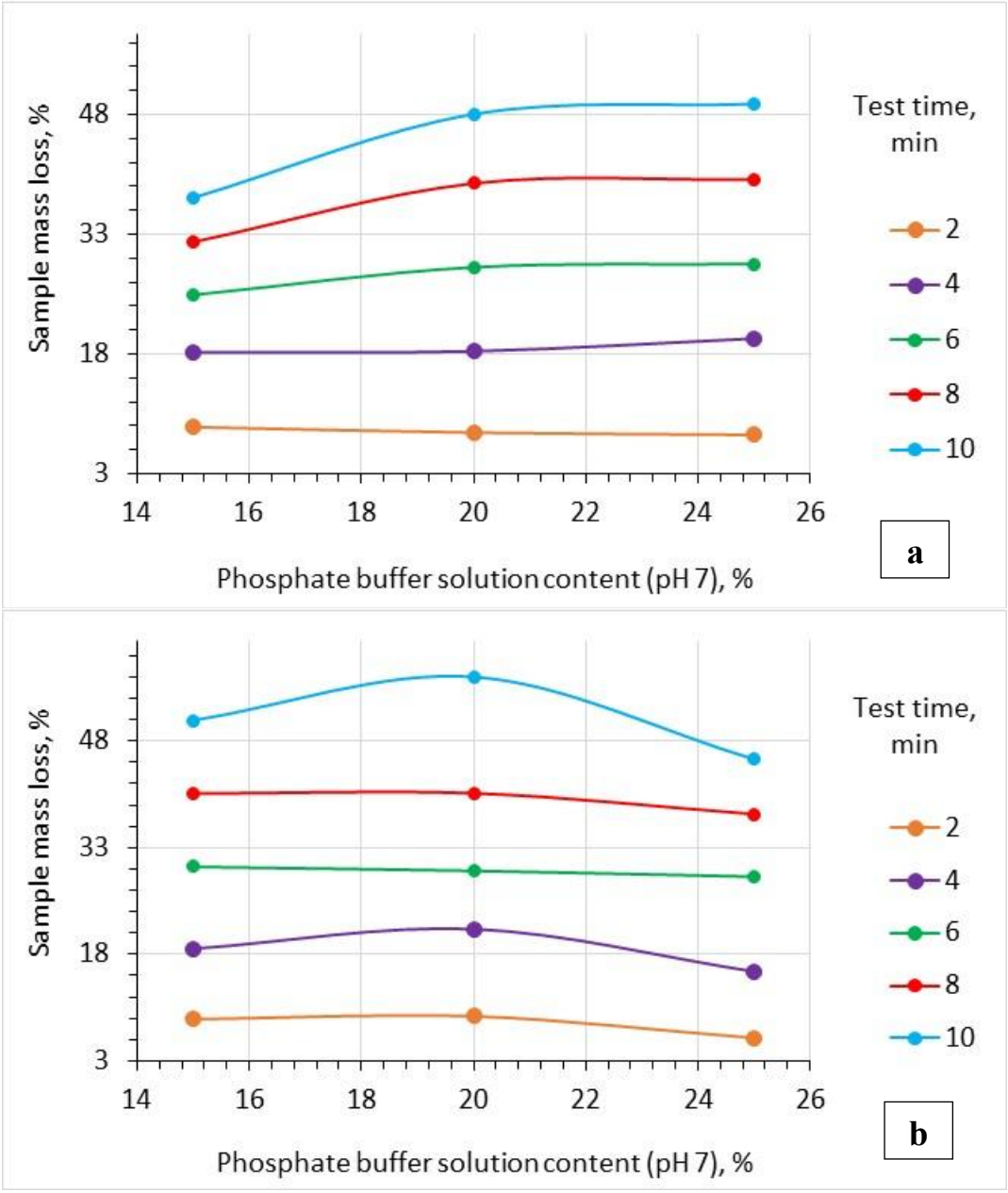


Fig. 4. Influence of the content of phosphate buffer solution with pH 7 and the time of fire test on the mass loss of samples with single-layer (a) and three-layer (b) coating

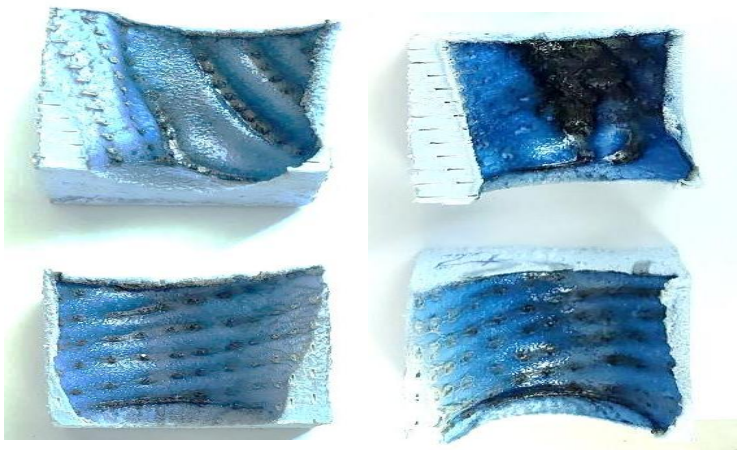


Fig. 5. Appearance of extruded polystyrene samples after fire tests

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

Tab. 2. Fire test results for extruded polystyrene foam samples

pH of buffer solution	Volume fraction of buffer solution, %	Number of coating layers	Sample mass loss, %	Ignition time, s	Note
Untreated sample			-	3	actively burned with the formation of burning drops
6	15	1		7	burned without the formation of burning droplets
		2		7	
		3	0.36	-	did not burn
	20	1	1.18	-	
		2	1.12	-	
		3	0	-	
	25	1	0.78	4	did not support combustion
		2	-	4	burned without the formation of burning droplets
		3	-	8	
7	15	1	1.14	-	did not burn
		2	-	8	burned without the formation of burning droplets
		3	-	7	
	20	1	0.77	-	did not burn
		2	1.12	-	
		3	1.07	-	
	25	1	-	5	burned without the formation of burning
		2	1.95	6	did not support combustion
		3	-	5	burned without the formation of burning
8	15	1	1.55	6	did not support combustion
		2	2.18	5	
		3	-	5	burned without the formation of burning
	20	1	-	6	
		2	1,14	-	did not burn
		3	-	5	burned without the formation of burning
	25	1	1.19	-	did not burn
		2	-	5	burned without the formation of burning
		3	1.8	-	did not burn

8. Discussion of the results of a study of the influence of phosphate buffer systems on the fire-retardant effectiveness of coatings

The use of infrared spectroscopy to analyze the phase composition of the fire-retardant composition allowed us to draw an important conclusion regarding the incorporation of phosphate ion into the siloxane chain of polysilicic acid. This allows us to control the mechanism of the gelation process (Fig. 1), because it is the structure of the siloxane polymer that affects the integrity of the fire-retardant coating during fire exposure: under the conditions of linear polycondensation, an elastic coating is formed, which, together with the base, can change its shape without the formation of cracks. The mechanism of polycondensation can be determined by comparing the values of the ratio of the intensity of the absorption band of the vibration of the –Si–O–Si– bonds at 1050 cm^{-1} to its width in the IR spectra of gel samples obtained at different pH values of the buffer solution. It can be assumed that when using a buffer solution with pH 6, H+ ions are released, which, together with the H+ ions of the acetate buffer solution formed during the preparation of the composition, initiate network polycondensation. At pH 7, the buffer mixture of dihydrogen phosphate and sodium hydrogen phosphate releases a smaller

number of hydrogen ions, therefore, linear polycondensation is initiated.

These assumptions are confirmed by the results of fire studies of wooden samples: the lowest mass losses were observed in wood samples treated with compositions containing 25 % phosphate buffer solution with pH 7. In addition, water molecules can be retained in the interglobule space, which, when evaporated, have a cooling effect on the surface of the material, thereby preventing combustion and flame spread.

The developed compositions of fire-retardant compositions can be used to protect both cellulose-containing material (wood) and synthetic material, which practically does not contain functional groups that can initiate the formation of covalent bonds between the coating surface and the synthetic base. Sufficient durability allows high-quality coating application on the surface of finishing materials. High adhesion of the coating to the base is explained by the formation of covalent bonds with the cellulose-containing base. When using the developed compositions for fire protection of expanded polystyrene, the coating is also sewn to the base, but there are very few such bonds, so the main influence on maintaining the density of the coating is provided by good adhesion of the composition to the expanded polystyrene surface (Fig. 5).

It has been established that a sharp heating of the coating surface leads to its partial melting, due to which the coating acquires thermoplasticity, therefore it does not crack and does not peel off from the polystyrene base during its shrinkage under the action of fire. This is what can explain the fact that extruded polystyrene foam will not support combustion if it gets into the fire zone. Fig. 5 shows that the melted surface is observed only in the fire zone. In the event of cracks in the coating, point fires of polystyrene foam appear, which spread very quickly, which leads to complete combustion of the sample. It must be said that even in this case, burning drops are not formed.

The minimum percentage of mass loss of samples (Tab. 2) after fire tests allows us to conclude that the optimal level of acidity of the composition should be pH7.

For extruded polystyrene foam, optimal results were obtained with compositions with a 20 % additive content with pH 6 and 7. Uniform burning of the samples also indicated the formation of a homogeneous coating. A separate role is played by the high sodium content in the fire-retardant composition. As is known, compounds of this metal are fusible. During the action of fire, the coating passes into a visco-plastic state, thereby increasing adhesion and preventing the formation of cracks in the coating.

Further research will be aimed at conducting tests in conditions as close as possible to real operational conditions, in particular, it is planned to develop a specialized laboratory facility to assess the fire-retardant efficiency of building finishing materials used for thermal insulation by mounting on external wall structures.

9. Conclusions

1. The influence of phosphate buffer solutions on the gelation processes in silicic acid sols was investigated. It was found that modification with phosphate buffer solutions ensures the survivability of the compositions for ~2 hours. The set of characteristic absorption bands of infrared spectra proved the homogeneity of the structure of the obtained fire-retardant coating, and the formation of heat-resistant silicophosphate bonds was also confirmed.

2. It was found that during fire tests, the mass loss of expanded polystyrene fluctuated in the range of 0–1.95 % depending on the number of layers of the applied coating; the mass loss of wooden samples with the developed coating was 6.2–7.9 %. Thus, it can be argued that silicic acid sol modified with a phosphate buffer solution with pH 7 (at 20–25 % additive content) can potentially be considered as a universal fire retardant composition for building materials such as wood and extruded polystyrene foam.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

References

1. Zhang, C., Jiang, Y., Li, S., Huang, Z., Zhan, X., Ma, N., Tsai, F. (2022). Recent trends of phosphorus-containing flame retardants modified polypropylene composites processing. Heliyon, 8(11), e11225. doi: 10.1016/ j.heliyon.2022.e11225

2. Varganici, C., Rosu, L., Bifulco, A., Rosu, D., Mustata, F., Gaan, S. (2022). Recent advances in flame retardant epoxy systems from reactive DOPO–based phosphorus additives. Polymer Degradation and Stability, 202, 110020. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110020

3. Zheng, T., Wang, W., Liu, Y. (2021). A novel phosphorus-nitrogen flame retardant for improving the flame retardancy of polyamide 6: Preparation, properties, and flame retardancy mechanism. Polymers for Advanced Technologies, 32(6), 2508–2516. doi:10.1002/pat.5281

4. Yan, Y., Liang, B. (2019). Flame-retardant behavior and mechanism of a DOPO-based phosphorus–nitrogen flame retardant in epoxy resin. High Performance Polymers, 31(8), 885–892. doi:10.1177/0954008318805794

5. Giraudo, M., Dubé, M., Lépine, M., Gagnon, P., Douville, M., Houde, M. (2017). Multigenerational effects evaluation of the flame retardant tris(2-butoxyethyl) phosphate (TBOEP) using Daphnia magna. Aquatic Toxicology, 190, 142–149. doi: 10.1016/j.aquatox.2017.07.003

6. Bolshova, T., Shvartsberg, V., Shmakov, A. (2021). Synergism of trimethylphosphate and carbon dioxide in extinguishing premixed flames. Fire Safety Journal, 125, 103406. doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103406

7. Chupeau, Z., Bonvallot, N., Mercier, F., Bot, B. L., Chevrier, C., Glorennec, P. (2020). Organophosphorus Flame Retardants: A global review of indoor contamination and human exposure in Europe and epidemiological evidence. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(18), 6713. doi: 10.3390/ijerph17186713

8. Giraudo, M., Douville, M., Houde, M. (2015). Chronic toxicity evaluation of the flame retardant tris (2-butoxyethyl) phosphate (TBOEP) using Daphnia magna transcriptomic response. Chemosphere, 132, 159–165. doi: 10.1016/j.chemosphere. 2015.03.028

9. Wang, K., Huang, W., Tian, Q., Tu, C., Yang, C., Yan, W. (2024). Multiple synergistic effects of silicon-containing flame retardants and DOPO derivative enhance the flame retardancy of epoxy resin. Polymer-Plastics Technology and Materials, 63(10), 1294–1305. doi: 10.1080/25740881.2024.2328617

10. 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

11. Skorodumova, O., Tarakhno, O., Chebotareva, O., Bajanova, K. (2022). Silicon protective coatings for textile materials based on liquid glass. Problems of Emergency Situations, 1(35), 109–119. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-8

12. DSTU 4479:2005 Rechovyny vohnezakhysni vodorozchynni dlia derevyny. Zahalni tekhnichni vymohy ta metody vyprobuvannia. Chynnyi z 01.10.2006. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2006, 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, 2020, 75.

14. Karan, R., Pal, P., Maiti, P., Das, K. (2021). Structure, properties and in-vitro response of SiO_2-Na_2O-CaO-P_2O_5 system, based glass-ceramics after partial replacement of Na_2O by Li_2O. Journal of Non-Crystalline Solids, 556, 120554. doi:

10.1016/j.jnoncrysol.2020.120554

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. Stýskalík, A., Škoda, D., Moravec, Z., Babiak, M., Barnes, C. E., Pinkas, J. (2015). Control of micro/mesoporosity in non-hydrolytic hybrid silicophosphate xerogels. Journal of Materials Chemistry. A, Materials for Energy and Sustainability, 3(14), 7477–7487. doi: 10.1039/C4TA06823H

Н. М. Лисак, *аспірант*
О. Б. Скородумова, *д.т.н., професор, проф. каф.*
А. А. Чернуха, *к.т.н., доцент, доц. каф.*
А. Я. Шаршанов, *д.т.н., доцент, доц. каф.*
Я. М. Гончаренко, *к.т.н., ст. викл. каф.*
С. М. Щербак, *к.т.н., доцент, ст. викл. каф.*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

СИЛІКОФОСФАТНІ ВОГНЕЗАХИСНІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ ОЗДОБЛЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено склад силікофосфатної композиції на основі рідкого скла для вогнезахисту будівельних оздоблювальних матеріалів. Композиції готували змішуванням водних розчинів рідкого скла та оцтової кислоти з додаванням фосфатних буферних розчинів з pH 6–8. Методом інфрачервоної спектроскопії досліджено фазовий склад експериментальних композицій та встановлено утворення зв'язків Si–O–P, що свідчить про вбудовування фосфат-іонів в силоксановий каркас гелів полікремнієвої кислоти. Встановлено, що на механізм поліконденсації впливають величина pH фосфатного буферного розчина, а також його вміст. Використання буферного розчину з pH 6 призводе до ініціалізації переважно сітчастої поліконденсації в золях рідкого скла. Підвищення pH до 7–8 забезпечує лінійну поліконденсацію полікремнієвої кислоти, що підвищує однорідність гелевого покриття, надає еластичності та підвищує його вогнезахисну дію. Живучість усіх досліджених композицій в середньому складає 2 години і практично не залежить від вмісту буферного розчину. Проведені вогневі випробування показали, що найкращі вогнезахисні властивості мають системи з вмістом буферного розчину 20–25 % з pH 7, які забезпечують максимальну стійкість до дії вогню та мінімальні втрати маси зразків під час дії високих температур. Для таких композицій встановлено I групу вогнезахисної ефективності, а обробка ними зразків деревини дозволяє перевести матеріал до групи «важкогорючі». Зразки екструдованого пінополістиролу, вкриті розробленими композиціями не горять, відзначається відсутність палаючих крапель. Отримані результати підкреслюють перспективність подальшого розвитку таких систем для захисту будівельних матеріалів.

Ключові слова: кремнезем, вогнезахисні покриття, фосфатні буфери, будівельні матеріали, термостійкість, вогнестійкість, деревина, пінополістирол

Література

1. Zhang C., Jiang Y., Li S., Huang Z., Zhan X., Ma N., Tsai F. Recent trends of phosphorus-containing flame retardants modified polypropylene composites processing. Heliyon. 2022. Vol. 11. № 8. P. e11225. doi: 10.1016/ j.heliyon.2022.e11225

2. Varganici C., Rosu L., Bifulco A., Rosu D., Mustata F., Gaan S. Recent advances in flame retardant epoxy systems from reactive DOPO–based phosphorus additives. Polymer Degradation and Stability. 2022. № 202. P. 110020. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110020

3. Zheng T., Wang W., Liu Y. A novel phosphorus-nitrogen flame retardant for improving the flame retardancy of polyamide 6: Preparation, properties, and flame retardancy mechanism. Polymers for Advanced Technologies. 2021. Vol. 6. № 32. P. 2508–2516. doi:10.1002/pat.5281

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, A. Sharshanov and others

4. Yan Y., Liang B. Flame-retardant behavior and mechanism of a DOPO-based phosphorus–nitrogen flame retardant in epoxy resin. High Performance Polymers. 2019. Vol. 8. № 31. P. 885–892. doi:10.1177/0954008318805794

5. Giraudo M., Dubé M., Lépine M., Gagnon P., Douville M., Houde M. Multigenerational effects evaluation of the flame retardant tris(2-butoxyethyl) phosphate (TBOEP) using Daphnia magna. Aquatic Toxicology. 2017. № 190. P. 142–149. doi: 10.1016/j.aquatox.2017.07.003

6. Bolshova T., Shvartsberg V., Shmakov A. Synergism of trimethylphosphate and carbon dioxide in extinguishing premixed flames. Fire Safety Journal. 2021. № 125. P. 103406. doi: 10.1016/j.firesaf.2021.103406

7. Chupeau Z., Bonvallot N., Mercier F., Bot B. L., Chevrier C., Glorennec P. Organophosphorus Flame Retardants: A global review of indoor contamination and human exposure in Europe and epidemiological evidence. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17. № 18. P. 6713. doi: 10.3390/ijerph17186713

8. Giraudo M., Douville M., Houde M. Chronic toxicity evaluation of the flame retardant tris (2-butoxyethyl) phosphate (TBOEP) using Daphnia magna transcriptomic response. Chemosphere. 2015. № 132. P. 159–165. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.03.028

9. Wang K., Huang W., Tian Q., Tu C., Yang C., Yan W. Multiple synergistic effects of silicon-containing flame retardants and DOPO derivative enhance the flame retardancy of epoxy resin. Polymer-Plastics Technology and Materials. 2024. Vol. 63. № 10. P. 1294–1305. doi: 10.1080/25740881.2024.2328617

10. 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

11. Skorodumova O., Tarakhno O., Chebotareva O., Bajanova K. Silicon protective coatings for textile materials based on liquid glass. Problems of Emergency Situations. 2022. Vol. 1. № 35. P. 109–119. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-8

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. Karan R., Pal P., Maiti P., Das K. Structure, properties and in-vitro response of SiO_2-Na_2O-CaO-P_2O_5 system, based glass-ceramics after partial replacement of Na_2O by Li_2O. Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. № 556. P. 120554. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2020.120554

15. Zribi M., Baklouti S. Investigation of phosphate based geopolymers formation mechanism. Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. № 562. P. 120777. doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2021.120777

16. Stýskalík A., Škoda D., Moravec Z., Babiak M., Barnes C. E., Pinkas J. Control of micro/mesoporosity in non-hydrolytic hybrid silicophosphate xerogels. Journal of Materials Chemistry. A, Materials for Energy and Sustainability. 2015. Vol. 14. № 3. P. 7477–7487. doi: 10.1039/C4TA06823H

Надійшла до редколегії: 07.10.2024
Прийнята до друку: 11.11.2024

УДК 519.6

В. В. Олійник, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)*
О. Є. Басманов, *д.т.н., професор, голов. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

МОДЕЛЬ ФОРМИ І РОЗМІРІВ РОЗЛИВУ ПРИ ВИТІКАННІ І ГОРІННІ РІДИНИ

Побудовано модель для визначення максимальної довжини і ширини розливу горючої рідини, що горить і стікає по похилій площині, за умови сталої швидкості її витікання. Модель спирається на диференціальне рівняння параболічного типу, що описує товщину шару рідини на поверхні ґрунту. Показано, що максимальні довжина та ширина розливу досягаються в усталеному режимі, який має місце внаслідок встановлення балансу між кількістю рідини, що поступає в розлив внаслідок витікання, і кількістю рідини, що витрачається внаслідок вигорання. Із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напряму нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання або збільшення об'ємної швидкості витікання. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання або зменшення об'ємної швидкості витікання призводить до того, що форма розливу наближається до кола. Показано, що для кутів нахилу поверхні не більше 20º, має місце подібність процесів розтікання рідини. Це означає, що збільшення об'ємної швидкості витікання еквівалентно лінійному перетворенню часової і просторових координат з одночасним зменшенням кута нахилу і лінійної швидкості вигорання. Побудовано алгоритм розрахунку максимальної довжини і максимальної ширини розливу для довільної горючої рідини при заданій об'ємній швидкості витікання на похилій поверхні, який спирається подібність процесів розтікання рідини і використовує діаграми залежності максимальної довжини і ширини розливу від кута нахилу поверхні і лінійної швидкості вигорання для еталонної об'ємної швидкості витікання 10 л/с. Отримані результати можуть бути використані для визначення висоти полум'я і щільності теплового потоку від пожежі до сусідніх технологічних об'єктів.

Ключові слова: розлив горючої рідини, пожежа розливу, форма розливу, усталений режим

1. Вступ

Аварійні витоки нафти та нафтопродуктів, що трапляються під час їх переробки і транспортування, часто супроводжуються пожежами, особливістю яких є динамічна зміна їх площі [1]. Скупчення легкозаймистих і горючих рідин, що характерне для об'єктів переробки і зберігання нафтопродуктів, призводить до небезпеки виникнення «ефекту доміно», коли одна аварійна подія створює передумови для наступної. У випадку пожежі на переробних підприємствах або на об'єктах зберігання нафтопродуктів, «ефект доміно» виникає внаслідок теплового впливу пожежі на металічні конструкції сусідніх технологічних об'єктів. Їх нагрів до температури самоспалахування парів нафтопродукту може призвести до вибуху парів або їх займанню. Ще однією небезпекою є розгерметизація фланцевих з'єднань і витікання горючої рідини в зону горіння або втрата міцності сталевими конструкціями [2]. В [3] проаналізовано 224 великих аварії і відзначено, що багатьом з них був притаманний «ефект доміно». В [4] показано, що пожежі спричиняють майже 43 % усіх «ефектів доміно», причому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу горючої рідини. Згідно з [5] близько 44 % масштабних пожеж, в яких спостерігався ефект «доміно», починалися саме з пожежі в резервуарі або з пожежі розливу.

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

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [6] проаналізовано аварії на залізничному транспорті в США і Канаді, які супроводжувалися розливом горючої рідини. Окремо виділено випадки, коли відбувалося займання розливу. На підставі історичних даних побудовано оцінки частоти майбутніх аварій, об'єму розлитої рідини, ймовірності пожежі тощо. Недоліком такого підходу є те, що він не дає можливостей розрахувати параметри розливу в конкретному випадку. Аналогічний підхід застосовано в [7], де досліджуються виливи небезпечних рідин при аваріях на трубопроводах у США в 1986–2019 роках. Відзначається, що в середньому під час аварій щороку виливається близько 10 тис. тонн. Не всі аварії рівнозначні за наслідками, тому серед всіх аварій виділено найбільш істотні аварії. Наприклад, ліквідація розливу сирої нафти в Мічигані тривала чотири роки і коштувала 1,2 мільярда доларів. Саме прогнозуванню частоти таких аварій присвячено роботу. Запропонований підхід дозволяє прогнозувати загальну кількість аварій, але не дозволяє визначити наслідки аварії за конкретних обставин.

В [8] методами чисельного моделювання досліджується розтікання і горіння рідини в похилому тунелі за умови неперервного витоку. Зроблено висновок про збільшення ширини потоку із збільшенням інтенсивності витікання. Але вихід на усталений режим внаслідок вигорання рідини залишено поза увагою. В [9] розглянуто витікання легкозаймистої рідини із резервуара внаслідок пошкодження його стінки на певній висоті. Визначено горизонтальну протяжність струменя рідини, але геометрична форма і розміри розливу, що утворився га ґрунті, не досліджено.

В [10] експериментально досліджено розтікання і горіння горючої рідини на похилій поверхні. Показано, що час розтікання і площа розливу залежать від кута нахилу поверхні. Однак розтікання досліджувалося на скляній поверхні, яка виключає можливість впливу нерівностей, притаманних реальній поверхні. В [11] експериментально досліджується товщина шару горючої рідини і швидкість її вигорання при неперервному витіканні на горизонтальну та похилу поверхні. Але і в цій роботі форму і розміри розливу залишено поза увагою.

В [12] експериментально досліджено розтікання горючою рідини по горизонтальній піщаній поверхні. Об'ємна швидкість витікання складала (0,04÷0,4) л/хв. Зроблено висновок про уповільнення розповсюдження розливу , а також про зменшення його радіусу порівняно з випадком розтікання на гладкій поверхні. Недоліком таких досліджень є складність розповсюдження отриманих результатів на інші умови: швидкість витікання рідини, іншу поверхню. В [13] побудовано модель розтікання рідини на ґрунті. Модель являє собою систему двох рівнянь, перше з яких є диференціальним рівнянням параболічного типу, яке описує розтікання рідини по поверхні, а друге – звичайним диференціальним рівнянням, яке враховує витрати рідини внаслідок просочення вглиб ґрунту. Але питання про вихід процесу на усталений режим внаслідок вигорання рідини в роботі не розглянуто. В [14] на прикладі сирої нафти і піску експериментально визначаються параметри просочення рідини (коефіцієнт пористості ґрунту, показник капілярності), але і тут розміри розливу в усталеному режимі залишені поза увагою.

В [15] експериментально досліджується розтікання етанолу, гасу і бензину по похилим поверхням, покритим піском і розташованих під кутами 0°, 5°, 10°, 15°, 20°. Швидкість витікання знаходилася в діапазоні (200÷400) мл/хв. Але витрати рідини внаслідок її вигорання не розглядалися. В [16] за допомогою методів машинного навчання побудовано модель для визначення характеристик пожежі

розливу. Модель враховує кут нахилу поверхні, швидкість витоку рідини, тип поверхні і тип рідини. Але недоліком такого підходу є неможливість застосування отриманих результатів для умов, що відрізняються від навчальної вибірки.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок теплового потоку на них є визначення форми і розмірів розливу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі форми і розмірів розливу горючої рідини на похилій в умовах неперервного витікання рідини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– побудувати модель розтікання рідини на похилій поверхні;

– проаналізувати подібність процесів розтікання для різних значень параметрів;

– розробити алгоритм визначення максимальної довжини і ширини розливу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес розтікання і горіння рідини на похилій поверхні при її аварійному виливі. Припускається, що витікання рідини відбувається неперервно зі сталою об’ємною швидкістю і сталою лінійною швидкістю вигорання. Для знаходження форми і розмірів розливу використано рівняння балансу маси рідини на поверхні ґрунту. При аналізі подібності процесів розливу при різних значенням параметрів використано розвинення в ряд Тейлора. Для чисельного розв’язання рівняння балансу використано метод скінчених різниць. Програмна реалізація методу виконувалася в середовище програмування Delphi 11.

5. Моделювання форми і розмірів розливу при аварійному витіканні і горінні рідини

5.1. Модель розтікання рідини на похилій поверхні

В [18] побудовано модель розтікання рідини на ґрунті, яка враховує як приток рідини внаслідок її витікання, так і витрати на її просочення і вигорання. Наявність нахилу у поверхні, на якій відбувається розтікання рідини, призводить до того, що розлив має форма овалу, більша вісь якого співпадає з напрямом нахилу поверхні. При цьому довжина цієї осі буде тим більшою, чим більшим є кут нахилу поверхні.

Максимальна площа розливу S_{max} визначається об’ємною швидкістю витікання рідини v і витратами на її вигорання і просочування:

$$v = S_{max}\left(\eta_v + \eta_{inf}\right), \tag{1}$$

де η_{inf} – лінійна швидкість просочування, м/с, η_v – лінійна швидкість вигорання, м/с:

$$\eta_v = \frac{\eta}{\rho};$$

η – питома масова швидкість вигорання рідини; ρ – густина рідини.

З точки зору пожежної небезпеки найгіршим є випадок, коли просочення рідини в ґрунт відсутнє ($\eta_{inf} = 0$), оскільки в цьому випадку площа розливу досягає максимального значення. За цієї умови рівняння розтікання і горіння рідини [18] набуде вигляду:

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

$$\frac{\partial h}{\partial t} = R\left[\frac{\partial}{\partial x}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y}\right)\right] - \gamma\frac{\partial}{\partial x}\tilde{h}^3\right] -$$

$$-\eta_v + v(t)\delta(x - x_0)\delta(y - y_0); \quad (2)$$

$$\tilde{h} = \begin{cases} h - h_{dp}, h - h_{dp} > 0; \\ 0, h - h_{dp} \le 0; \end{cases} \quad (3)$$

де h(x,y) – висота рідини у точці (x,y), обчислена вздовж нормалі до поверхні; δ(x) – δ-функція Дірака; γ=tgθ; θ – кут нахилу поверхні; R – ефективний коефіцієнт дифузії:

$$R = \frac{g}{3\nu}\cos\theta; \quad (4)$$

g – прискорення сили тяжіння; ν – кінематична в'язкість рідини. При цьому розташування системи координат обрано таким чином, щоб напрямок нахилу поверхні співпадав з віссю OX; h_{dp} – середня глибина нерівностей поверхні.

5.2. Подібність процесів розтікання для різних значень параметрів

Для випадку неперервного витікання зі сталою швидкістю $v(t) = v_0 = \text{const}$. Це дозволяє перейти до нових змінних x', y', t':

$$x = \frac{x'}{\sqrt{v_0}}; \; y = \frac{y'}{\sqrt{v_0}}; \; t = \frac{t'}{v_0}. \quad (5)$$

Тоді рівняння (2) трансформується до вигляду

$$v_0\frac{\partial h}{\partial t'} = v_0 R\left[\frac{\partial}{\partial x'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'}\right)\right] - \frac{\gamma}{\sqrt{v_0}}\frac{\partial}{\partial x'}\tilde{h}^3\right] -$$

$$-\eta_v + v_0\delta\left(x' - x_0\sqrt{v_0}\right)\delta\left(y' - y_0\sqrt{v_0}\right). \quad (6)$$

Розділивши на v_0 ліву і праву частину рівняння, отримаємо

$$\frac{\partial h}{\partial t'} = R\left[\frac{\partial}{\partial x'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'}\right)\right] - \gamma'\frac{\partial}{\partial x'}\tilde{h}^3\right] -$$

$$-\eta'_v 1_{\Omega_b}(t) + \delta\left(x' - x_0\sqrt{v_0}\right)\delta\left(y' - y_0\sqrt{v_0}\right), \quad (7)$$

де

$$\gamma' = \frac{\gamma}{\sqrt{v_0}} = \frac{tg\theta}{\sqrt{v_0}}; \tag{8}$$

$$\eta'_v = \frac{\eta_v}{v_0}. \tag{9}$$

Аналіз рівняння (7) свідчить, що збільшення об'ємної швидкості витікання рідини в v_0 разів ($v_0 > 1$) еквівалентно лінійному перетворенню просторових і часової координат

$$x' = x\sqrt{v_0};\ y' = y\sqrt{v_0};\ t' = tv_0, \tag{10}$$

зменшенню кута нахилу поверхні у відповідності до (8) і зменшенню лінійної швидкості вигорання в v_0 разів (9).

Відзначимо, що для малих кутів нахилу поверхні θ мають місце співвідношення:

$$tg\theta \approx \theta;\ \cos\theta \approx 1. \tag{11}$$

Зокрема, для $\theta = 10^o = 10\pi/180 \approx 0{,}175$

$$tg\theta \approx 0{,}176;\ \cos\theta \approx 0{,}985,$$

а для $\theta = 20^o = 20\pi/180 \approx 0{,}35$

$$tg\theta \approx 0{,}365;\ \cos\theta \approx 0{,}94.$$

Отже для малих кутів нахилу поверхні ($\theta \le 20^o$) збільшення швидкості витікання рідини в v_0 разів еквівалентно перетворенню координат (10), зменшенню кута нахилу поверхні в $\sqrt{v_0}$ разів

$$\theta' = \frac{\theta}{\sqrt{v_0}}, \tag{12}$$

зменшенню лінійної швидкості вигорання в v_0 разів. При цьому ефективний коефіцієнт дифузії R буде залишатися незмінним.

З аналізу рівняння (7) випливає, що в усталеному режимі:

$$0 = R\left[\frac{\partial}{\partial x'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x'}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial y'}\left[\tilde{h}^3\left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial y'}\right)\right] - \gamma'\frac{\partial}{\partial x'}\tilde{h}^3\right] -$$

$$- \eta'_V 1_{\Omega_b}(t) + \delta\left(x' - x_0\sqrt{v_0}\right)\delta\left(y' - y_0\sqrt{v_0}\right), \tag{13}$$

форма розливу буде визначатися двома параметрами: кутом нахилу γ' і лінійною швидкістю вигорання η'_V.

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

На рис. 1 і рис. 2 показано залежність максимальної довжини a_{max} і максимальної ширини b_{max} розливу від кута нахилу поверхні θ та лінійної швидкості вигорання η_v для швидкості витікання рідини 10 л/с, де вісі θ і η_v подано в логарифмічних координатах.

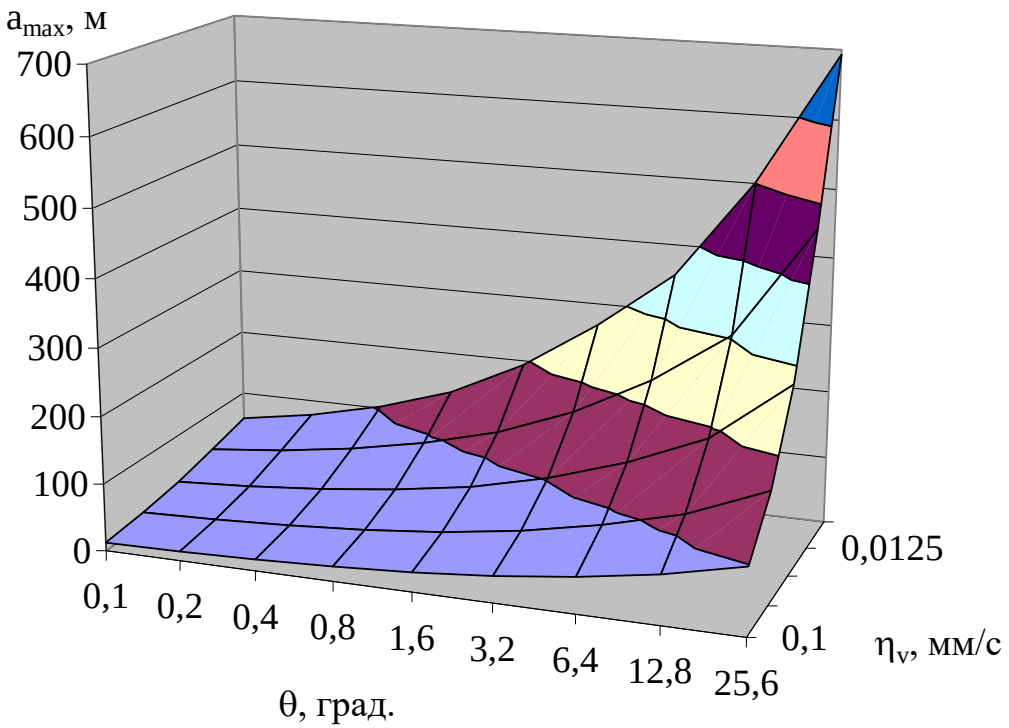


Рис. 1. Залежність максимальної довжини розливу від кута нахилу поверхні θ та лінійної швидкості вигорання η_v при швидкості витікання рідини 10 л/с

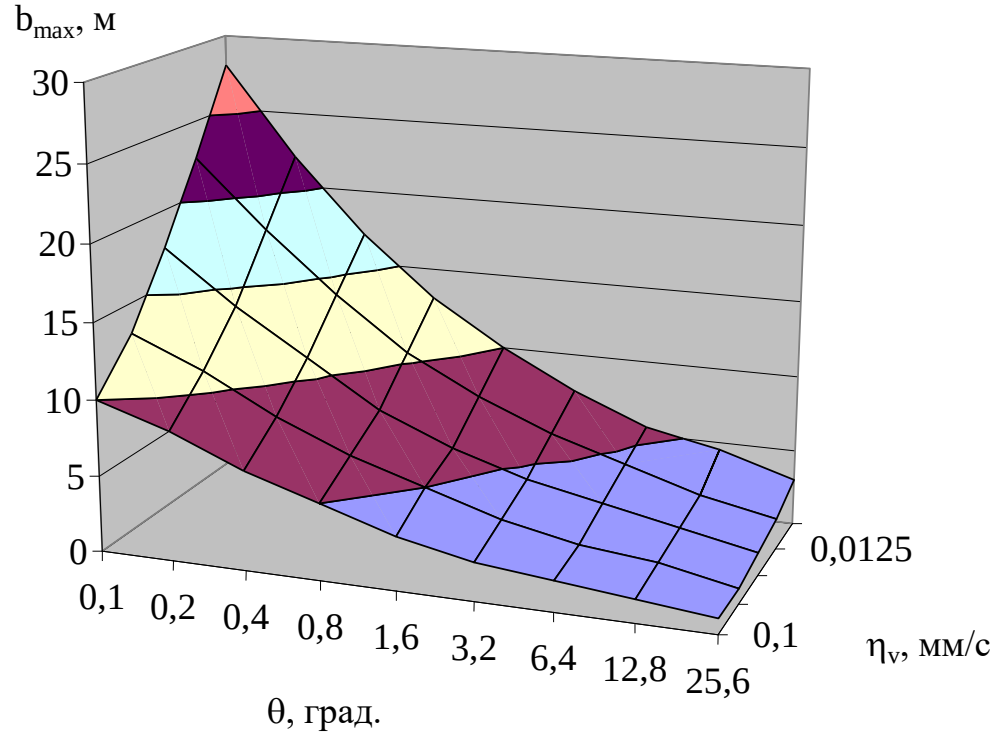


Рис. 2. Залежність максимальної ширини розливу від кута нахилу поверхні θ та лінійної швидкості вигорання η_v при швидкості витікання рідини 10 л/с

На рис. 3 наведено відношення ширини розливу до його довжини, що характеризує ступінь відхилення його форми від кола.

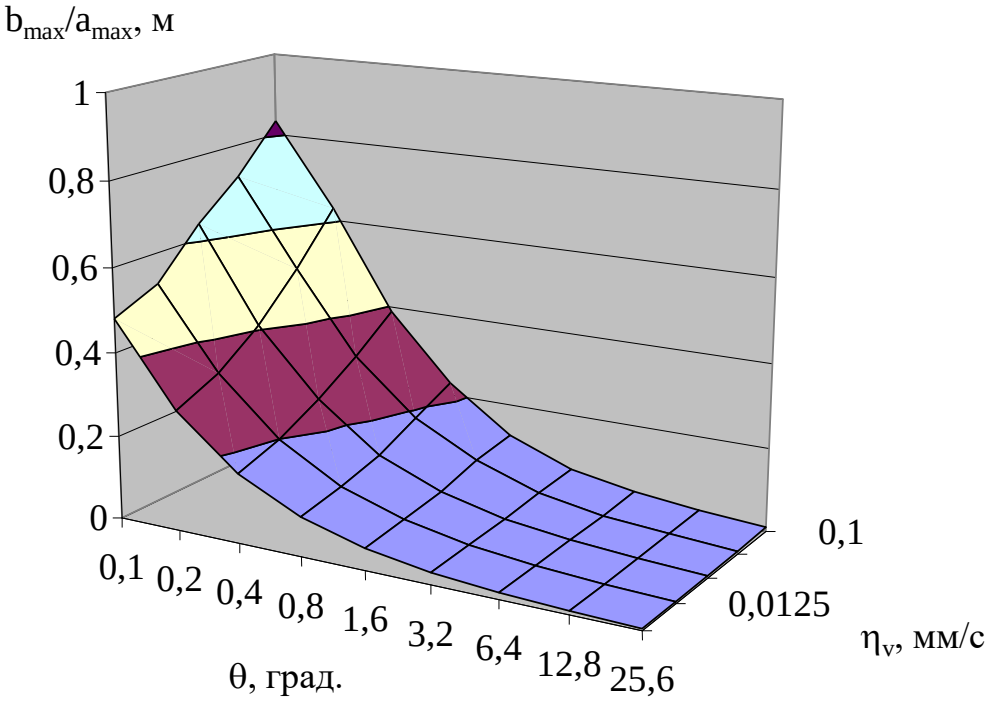


Рис. 3. Відношення довжини розливу до його ширини в залежності розливу від кута нахилу поверхні θ та лінійної швидкості вигорання η_v при швидкості витікання рідини 10 л/с

Аналіз графічної залежності на рис. 3 свідчить, що збільшення кута нахилу і зменшення питомої масової швидкості вигорання призводить до зменшення відношення ширини розливу до його довжини, тобто форма розливу стає більш витягнутою в напрямку нахилу поверхні. Навпаки, при зменшенні кута нахилу і збільшенні питомої масової швидкості вигорання форма розливу наближається до кола.

5.3. Алгоритм визначення максимальної довжини і ширини розливу

Діаграми на рис. 1 і рис. 2 дозволяють визначити максимальні довжину і ширину розливу на похилій поверхні з кутом θ довільної горючої рідини з лінійною швидкістю вигорання η_v (мм/с) і об'ємною швидкістю витікання v_0 (л/с). Для цього необхідно виконати наступні дії.

1. Розраховуємо коефіцієнт пропорційності

$$k = \frac{v_0}{10}, \tag{14}$$

який показує у скільки разів об'ємна швидкість витікання перевищує еталонну швидкість 10 л/с, для якої були побудовані діаграми на рис. 1 і рис. 2.

2. Розраховуємо наведений кут нахилу

$$\theta' = \frac{\theta}{\sqrt{k}} \tag{15}$$

і наведену лінійну швидкість вигорання

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

$$\eta'_v = \frac{\eta_v}{k}. \tag{16}$$

3. За діаграмою на рис. 1 визначаємо довжину розливу $\tilde{a}_{max}$, виходячи з кута нахилу θ′, лінійної швидкості вигорання η'_v і об'ємної швидкості витікання 10 л/с.

4. За діаграмою на рис. 2 визначаємо ширину розливу $\tilde{b}_{max}$, виходячи з кута нахилу θ′, лінійної швидкості вигорання η'_v і об'ємної швидкості витікання 10 л/с.

5. Обчислюючи

$$a_{max} = \tilde{a}_{max}\sqrt{k}; \tag{17}$$

$$b_{max} = \tilde{b}_{max}\sqrt{k}, \tag{18}$$

знаходимо максимальну довжину a_{max} і b_{max} ширину розливу.

6. Обговорення результатів моделювання форми і розмірів розливу при витіканні і горінні рідини

При розтіканні рідини на горизонтальній поверхні розлив має форму близьку до кола. Якщо розтікання відбувається на похилій поверхні, то розлив має форму овалу, витягнутого в напрямку нахилу поверхні. Динаміка розтікання рідини залежить від кута нахилу поверхні, в'язкості рідини, середньої глибини нерівностей тощо. Але максимальна площа розливу визначається лише надходженням рідини в розлив та її витратами внаслідок просочення і вигорання. При цьому витрати рідини є пропорційними площі розливу. Цим пояснюється існування граничної площі розливу за умови сталої швидкості витікання рідини.

Типова швидкість просочення рідини в ґрунт є приблизно на порядок меншою порівняно зі швидкістю її вигорання. Наприклад, експеримент з просоченням сирою нафти в сухий пісок [17] дав оцінку швидкості просочення 0,003 мм/с, в той час, як лінійна швидкість вигорання складає близько 0,04 мм/с. Це дозволяє при оцінці максимальної площі розливу не враховувати витрати рідини на просочення вглиб ґрунту. Внаслідок цього рівняння розтікання і горіння рідини набуває вигляду (2–3). Вказане рівняння є нелінійним диференціальним рівнянням другого порядку параболічного типу, що описує товщину шару рідини над поверхнею ґрунту.

У випадку неперервного витікання рідини зі сталою швидкістю лінійне перетворення просторових і часової координат (5) трансформує рівняння (2) до вигляду (6), а потім (7). На відміну від (5) рівняння (7) замість трьох параметрів (кут нахилу, об'ємна швидкість витікання і лінійна швидкість вигорання) містить лише два параметри, які виражаються через них – формули (8) і (9). Із аналізу залежностей (7–9) випливає, що збільшення об'ємної швидкості витікання еквівалентно лінійному перетворенню просторових і часової координати (10) з одночасним зменшенням кута нахилу (8) і лінійної швидкості вигорання (9).

Розвинення функцій tgθ і cosθ в ряд Тейлора в околі точки θ=0 свідчить, що для малих значень кута θ мають місце наближені рівності (11), причому для tgθ похибка такого наближення має порядок $O(\theta^3)$, а для cosθ – порядок $O(\theta^2)$. Внаслідок цього для кутів нахилу поверхні $\theta \le 20^o$ відносна похибка наближення (11) не перевищує 4,2 % для тангенса і 6,5 % для косинуса. Це дозволяє вважати ефек-

тивний коефіцієнт дифузії R таким, що практично не залежить від кута нахилу поверхні.

Максимальні розміри розливу досягаються в усталеному режимі (13), коли надходження рідини за рахунок витікання будуть дорівнювати її витратам внаслідок вигорання. В цьому випадку розміри розливу і товщина шару рідини залишаються незмінними. Аналіз зображень на рис. 1 і рис. 2 підтверджує, що із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напряму нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання. Це відбувається внаслідок того, що збільшується об'єм рідини, який встигає стекти вниз перш, ніж вигорить. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання призводить до того, що форма розливу наближається до кола (рис. 3).

Подібність процесів розтікання рідин, що задається перетвореннями (9), (10), (12), дозволяє використовувати діаграми на рис. 1 і рис. 2 для оцінки максимальних розмірів розливу для довільного значення об'ємної швидкості витікання. Наведений алгоритм зводиться до визначення коефіцієнта пропорційності (14), який показує, у скільки разів об'ємна швидкість витікання більша ніж 10 л/с. Виходячи з нього розраховуються наведений кут нахилу (15) і наведена лінійна швидкість вигорання (16). Ці параметри є вихідними для діаграм на рис. 1 і рис. 2. Отримані з них значення за допомогою перетворень (17), (18) дозволяють визначить довжину і ширину розливу.

Перевагою даного підходу є можливість знаходження довжини і ширини розливу без розв'язання диференціального рівняння в частинних похідних [18], що описує динаміку розтікання рідини.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований лише у випадку, коли відсутні істотні перешкоди для розтікання рідини.

Недоліком зазначеного підходу є те, що він не дозволяє точно визначити межі овалу, що відповідає розливу, а лише його довжину і ширину.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням теплового потоку від пожежі розливу горючої рідини до сусідніх об'єктів.

6. Висновки

1. При розтіканні і горінні рідини на похилій поверхні розлив має форму овалу. Показано, що розлив досягає максимальних розмірів в усталеному режимі. Причиною є те, що витрати рідини внаслідок вигорання пропорційні площі розливу, а швидкість витікання рідини є сталою. В цьому режимі форма розливу буде визначатися диференціальним рівнянням другого порядку еліптичного типу. Параметрами рівняння є кут нахилу поверхні, лінійна швидкість вигорання рідини та її об'ємна швидкість витікання. Із збільшенням кута нахилу форма розливу стає все більш витягнутою вздовж напряму нахилу поверхні. Такий саме ефект має зменшення лінійної швидкості вигорання або збільшення об'ємної швидкості витікання. Навпаки, зменшення кута нахилу поверхні і збільшення лінійної швидкості вигорання або зменшення об'ємної швидкості витікання призводить до того, що форма розливу наближається до кола.

2. Показано, що для практично значущих кутів нахилу поверхні ($\theta \leq 20^{o}$) має місце приблизна подібність процесів розтікання рідини. Це стає можливим внаслідок розвинення в ряд Тейлора функцій $\cos\theta$ і $\mathrm{tg}\theta$ в околі точки 0 і залишення лише перших членів рядів. Збільшення швидкості витікання рідини в k разів екві-

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

валентно масштабуванню просторових координат в $\sqrt{k}$ разів, часової координати в k разів, зменшенню кута нахилу поверхні в $\sqrt{k}$ разів, зменшенню лінійної швидкості вигорання в k разів. Похибка такого наближення не перевищує 6,5 %.

3. Побудовано алгоритм розрахунку максимальної довжини і максимальної ширини розливу для довільної горючої рідини при заданій об'ємній інтенсивності витікання на похилій поверхні. Алгоритм спирається на подібність процесів розтікання рідини на похилій поверхні і використовує діаграми залежності максимальної довжини і ширини розливу від кута нахилу поверхні і лінійної швидкості вигорання для еталонної об'ємної швидкості витікання 10 л/с. Перевагою алгоритму є можливість знаходження максимальної довжини і максимальної ширини розливу без розв'язання диференціального рівняння в частинних похідних, що описує динаміку розтікання рідини.

Література

1. Liu J., Li D., Wang Z., Chai X. A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. P. 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

2. 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

3. Abdolhamidzadeh B., Abbasi T., Rashtchian D., Abbasi S. A. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011. Vol. 24(5). P. 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013

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. 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

6. Etkin D., Horn M., Wolford A. CBR-Spill RISK: Model to Calculate Crude-by-Rail Probabilities and Spill Volumes. International Oil Spill Conference Proceedings. 2017. Vol. 2017(1). P. 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189

7. Liu S., Liang Y. Statistics of catastrophic hazardous liquid pipeline accidents. Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 208. P. 107389. doi: 10.1016/j.ress.2020.107389

8. Guo Q., Li Y. Z., Ingason H., Yan Z., Zhu H. Study on spilled liquid from a continuous leakage in sloped tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology. 2022. Vol. 120. P. 104290. doi: 10.1016/j.tust.2021.104290

9. He J., Yang L., Ma Y., Yang D., Li A., Huang L., Zhan Y. Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 141. P. 390–401. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.053

10. Zhao J., Zhu H., Zhang J., Huang H., Yang R. Experimental study on the spread and burning behaviors of continuously discharge spill fires under different slopes. Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 392. P. 122352. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122352

11. Li Y., Meng D., Yang L., Shuai J. Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. Case Studies in Thermal Engineering. 2022. Vol. 36. P. 102217. doi: 10.1016/j.csite.2022.102217

12. Li Z., Wang Q., Li H., Tang F. Experimental study on spread radius and burning rate of spill fires on a fine sand substrate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023. Vol. 148(21). P. 12109–12118. doi: 10.1007/s10973-023-12535-0

13. Keller J. M., Simmons C. S. The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills Over Flat Permeable Surfaces. Pacific Northwest National Laboratory. 2005. URL: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15058.pdf

14. Abramov Y., Basmanov O., Khmyrov I., Oliinik V. Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid infiltration in bulk material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4/10(118). P. 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249

15. Abbasi T., Kumar V., Tauseef S. M., Abbasi S. A. Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces. Journal of Chemical Health & Safety. 2018. Vol. 25(5). P. 19–27. doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004

16. Sahin E., Lattimer B. Y., Duarte J. P. Assessing spill fire characteristics through machine learning analysis. Annals of Nuclear Energy. 2023. Vol. 192. P. 109961. doi: 10.1016/j.anucene.2023.109961

17. Олійник В. В., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Метод експериментального визначення параметрів просочення рідини в ґрунт. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2(36). С. 15–25. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-2

18. Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель розтікання і горіння рідини на ґрунті. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

V. Oliinyk, *PhD, Associated Professor, Head of Department*
O. Basmanov, *Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MODEL OF SPILL SHAPE AND SIZE WHEN LIQUID IS LEAKING AND BURNING

A model was built to determine the maximum length and width of a spill of a flammable liquid burning and flowing down an inclined plane, under the condition of a constant speed of its outflow. The model is based on a parabolic differential equation that describes the thickness of the liquid layer on the soil surface. It is shown that the maximum spill length and width are achieved in a steady state, which occurs due to the establishment of a balance between the amount of liquid entering the spill due to leakage and the amount of liquid consumed due to burnout. As the angle of inclination increases, the shape of the spill becomes more and more elongated along the direction of the surface inclination. A decrease in the linear burnout rate or an increase in the volume flow rate has the same effect. On the contrary, decreasing the angle of inclination of the surface and increasing the linear speed of burning or decreasing the volumetric flow rate leads to the fact that the shape of the spill approaches a circle. It is shown that for surface inclination angles of no more than 20º, there is a similarity in the processes of liquid spreading. This means that an increase in the volume flow rate is equivalent to a linear transformation of the spatial and temporal coordinates with a simultaneous decrease in the angle of inclination and the linear burnout rate. An algorithm for calculating the maximum length and maximum width of a spill for an arbitrary combustible liquid at a given volume intensity of flow on an inclined surface is built, which is based on the similarity of the processes of liquid spreading on an inclined surface and uses diagrams of the dependence of the maximum length and width of the spill on the angle of inclination of the sur-

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

face and the linear speed of burning for a reference volumetric flow rate of 10 l/s. The obtained results can be used to determine the height of the flame and the density of the heat flow from the fire to nearby technological objects.

Keywords: flammable liquid spill, spill fire, spill form, steady state

References

1. Liu, J., Li, D., Wang, Z., & Chai, X. (2021). A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

2. 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/matecconf/201823002036

3. Abdolhamidzadeh, B., Abbasi, T., Rashtchian, D., Abbasi, S. A. (2011). Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 24(5), 575–593. doi: 10.1016/j.jlp.2010.06.013

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. 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

6. Etkin, D. S., Horn, M., Wolford, A. (2017). CBR-Spill RISK: Model to Calculate Crude-by-Rail Probabilities and Spill Volumes. International Oil Spill Conference Proceedings, 2017(1), 3189–3210. doi: 10.7901/2169-3358-2017.1.3189

7. Liu, S., Liang, Y. (2021). Statistics of catastrophic hazardous liquid pipeline accidents. Reliability Engineering & System Safety, 208, 107389. doi: 10.1016/j.ress.2020.107389

8. Guo, Q., Li, Y. Z., Ingason, H., Yan, Z., Zhu, H. (2022). Study on spilled liquid from a continuous leakage in sloped tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 120, 104290. doi: 10.1016/j.tust.2021.104290

9. He, J., Yang, L., Ma, Y., Yang, D., Li, A., Huang, L., & Zhan, Y. (2020). Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank. Process Safety and Environmental Protection, 141, 390–401. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.053

10. Zhao, J., Zhu, H., Zhang, J., Huang, H., & Yang, R. (2020). Experimental study on the spread and burning behaviors of continuously discharge spill fires under different slopes. Journal of Hazardous Materials, 392, 122352. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122352

11. Li, Y., Meng, D., Yang, L., Shuai, J. (2022). Experimental study on the burning rate of continuously released spill fire on open surface with measurement of burning fuel thickness. Case Studies in Thermal Engineering, 36, 102217. doi: 10.1016/j.csite.2022.102217

12. Li, Z., Wang, Q., Li, H., Tang, F. (2023). Experimental study on spread radius and burning rate of spill fires on a fine sand substrate. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 148 (21), 12109–12118. doi: 10.1007/s10973-023-12535-0

13. Keller, J., Simmons, C. (2005). The Influence of Selected Liquid and Soil Properties on the Propagation of Spills Over Flat Permeable Surfaces. Pacific North-

west National Laboratory. Available at: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-15058.pdf

14. Abramov, Y., Basmanov, O., Khmyrov, I., & Oliinik, V. (2022). Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid infiltration in bulk material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/10(118), 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249

15. Abbasi, T., Kumar, V., Tauseef, S. M., & Abbasi, S. A. (2018). Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces. Journal of Chemical Health & Safety, 25(5), 19–27. doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004

16. Sahin, E., Lattimer, B., Duarte, J. (2023). Assessing spill fire characteristics through machine learning analysis. Annals of Nuclear Energy, 192, 109961. doi: 10.1016/j.anucene.2023.109961

17. Oliinik, V., Basmanov, O., Mykhailovska, Yu. (2022). Method of experimental determining the parameters of impregnating a liquid into the soil. Problems of Emergency Situations, 2(36), 15–25. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-2

18. Oliinik, V., Basmanov O. (2023). Model of spreading and burning the liquid on the soil, 1(37), 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

Надійшла до редколегії: 11.10.2024
Прийнята до друку: 12.12.2024

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

УДК 641.841

***К. М. Остапов*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1275-741X)*
***О. С. Чаплигін*[2]**, *к.т.н., заст. нач. Головного управління (ORCID 0009-0005-9818-0277)*
***А. А. Лісняк*[1]**, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-5526-1513)*
***І. М. Грицина*[1]**, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-2581-1614)*
***С. М. Шевченко*[1]**, *к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-6740-9252)*
***Є. М. Криворучко*[1]**, *викл. каф. (ORCID 0000-0001-7332-9593)*
[1]Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна
[2] Головне управління ДСНС України у Харківській області

ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ НЕЙТРАЛЬНИХ ГАЗІВ ДЛЯ ПОЖЕЖОГАСІННЯ У ФОНДОСХОВИЩАХ МУЗЕЇВ

Створено ефективну вогнегасну систему для гасіння пожеж у фондосховищах музеїв сумішшю нейтральних газів, котрі не спотворюють музейні художні цінності та спроможні конкурувати з кращими іноземними зразками систем об'ємного газового пожежогасіння. Оптимізовано пропорцію газової суміші у складі аргону, азоту та двоокису вуглецю для пожежогасіння музейних художніх цінностей. Враховуючи вимоги Монреальського протоколу про речовини, що виснажують озоновий шар проведено аналіз стану питання й особливостей рішення проблеми газового гасіння пожеж в художніх музеях та їх фондосховищах. Розроблено ефективний та відносно недорогий склад суміші нейтральних газів для використання при об'ємному гасінні можливих пожеж у фондосховищах і музеях, який забезпечує збереження незмінними матеріальні та художньо-естетичні цінності без їх спотворення. Визначені об'ємні долі двох зразків суміші нейтральних газів №14 (CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %) та № 15 (CO_2=40 %, N_2=50 %, Ar=10 %), які близькі за своїм складом та мають найкращі показники вогнегасної ефективності за часом гасіння модельного вогнища 4,6 с та 4,8 с. Розроблено лабораторний стенд, як аналог установки об'ємного газового пожежогасіння зі змішувачем складових запропонованої робочої суміші нейтральних газів, на якому відпрацьовано показники ефективності гасіння модельних пожеж при гасінні зразків різноманітних фрагментів художніх підмальовок на частинах рядні та ватмані. Обґрунтовано технічні параметри робочої камери лабораторного стенду, а на математичній його моделі визнано раціональні співвідношення тисків заповнення змішувача стенду компонентами суміші нейтральних газів, що дає можливість удосконалити існуючі промислові установки різних типорозмірів. Обґрунтовано зниження коштовності запропонованого нейтрального газу.

Ключові слова: фондосховища музеїв, вогнегасна суміш нейтральних газів, архітектурно-конструктивні і об'ємно-планувальні рішення, протипожежний захист

1. Вступ

На сьогоднішній день для гасіння внутрішніх пожеж [1] розроблено та ефективно використовуються різні технічні засоби [2]. Однак при гасінні музейних художніх цінностей необхідно враховувати особливості розвитку пожеж у музеях [3]. Відомо, що активна діяльність музеїв світу в значній мірі базується на фондах їх експозиційних колекцій, які більшою частиною зберігаються у так званих запасниках, в котрих мається пожежно-технічне обладнання (ПТО) [4]. Воно відповідно пристосовується до об'ємно-планувальних рішень конкретних приміщень фондосховищ. Само фондосховище, може бути збудовано окремо від музею. Природно, що захисту раритетів, що зберігаються в художніх музеях і їх запасниках, потрібен особливий підхід – треба мати на випадок пожеж сучасне обладнання об'ємного газового пожежогасіння [5].

Слід сказати, що характерною особливістю музеїв є збільшення кількості експонатів, з бажанням постійного їх поповнення для поновлення експозицій. Тому фондові запасники, як правило, подвоюються приблизно кожні 15–25 років. Природно, що привабливість відвідування музеїв йде в основному за рахунок наявності

раритетів у фондосховищах, де зберігається основна маса експонатів (80–90 %), тому саме тут накопичується значні музейні художні цінності (МХЦ), які можуть при пожежах зовсім знищитися.

Нажаль, у фондосховищах музеїв України ще й сьогодні застосовують застаріли хладонові або вуглекислотні устрої об'ємного газового пожежогасіння. Крім цього, за останніми даними кількості пожеж та їх наслідки на об'єктах мінкультури України зросла на порядок, а втрати від них збільшились у рази [6]. При чому, фактичний стан протипожежного захисту вітчизняних музеїв під час сьогоднішньої війни погіршився [7]. А це свідчить про актуальність проблеми зберігання та захисту від пожеж історичних і культурних цінностей українського народу. З цього випливає потреба подальшого удосконалення засобів пожежного захисту музеїв і їх фондосховищ, що не аби як обумовлено специфікою пожежного захисту скупченості значної кількості духовної і художньої вартості у відносно не великих приміщеннях фондосховищ музеїв України.

Найбільш розповсюдженим способом гасіння приміщення для експозиції та зберігання МХЦ є об'ємний спосіб газового пожежогасіння [8]. Разом з цим, наявність систем вентиляції й кондиціювання повітря в музеях, значне горюче навантаження, декоративне оздоблювання приміщень створюють сприятливі умови для швидкого розвитку й поширення горіння з відділенням токсичних газів [9]. Також в умовах широкомасштабного воєнного протистояння України російському агресору не виключається розміщення фондосховищ музеїв окремо від самих музеїв.

Таким чином, проблема протипожежного захисту музеїв в умовах сучасності є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У зв'язку зі специфікою цієї теми обсяг інформації, присвяченої особливим підходам до протипожежного захисту (ППЗ) та тенденції розвитку новітніх розробок газового пожежогасіння музеїв в науково-технічних виданнях, невеликий. Тим не менш, в оглядовій закордонній публікації [10] підтверджується зацікавленість фахівців до вказаної проблеми. А вона дійсно – актуальна. Нагадаємо скіфську колекцію історичного Криму, яка до повернення її до України була у Нідерландах. Щоб було б з нею, якщо би вона зберігалася у кримських музеях! А художні скарби Абхазії – більша частина з них знищена недавньою пожежею [11]. Тут можна розгледіти загарбницький слід рашитських інтервентів. Аналогічна біда сталася і в Херсонському художньому музеї [12]. Підкреслимо, що в обох прикладах захист МХЦ від пожеж базувався на використанні застарілих вуглекислотних систем.

Аналіз класифікаторів МПК A62C35/00, A62C13/22, A62C31/02 з ретроспективою за 2003–2023 роки показав, як пожежна небезпека фондосховищ музеїв країни взагалі змінювалася не дуже жваво [13]. Нажаль необхідне удосконалення ППЗ музеїв не «слідує» за сучасними змінами об'ємів горючого навантаження, реальними обставинами й умовами зберігання експонатів в тих самих запасниках та ін.

В роботі [14] зазначено, що об'ємне гасіння засноване на створенні в приміщенні, що захищається, середовища, яке не підтримує горіння, є одним з найбільш ефективних способів пожежного захисту МХЦ. Основними недоліками є недостатня ефективність газових систем пожежогасіння в Україні, а ті, які використовуються в теперішній час – ще й досі базуються на використанні різноманітних марках хладонів та діоксину вуглецю. Протягом вже багатьох десятиріч в фондосховищах музеїв Європи та Америки й деяких інших країн протипожежний

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

захист МХЦ діє за вимогами Монреальського протоколу про речовини, що виснажують озоновий шар [15], який підписали Україна та 46 кран світу. В ньому взагалі йдеться про повну заборону використання любих газів, що руйнують озоновий захисний шар атмосфери Землі, й перш за все – різновиди хладону.

На час його підписання в закордонних музеях вже було гарно відпрацьований досвід зі створення систем об'ємного газового пожежогасіння МХЦ з використанням вже небажаних для озону газів, а саме: элегаза (SF_6); хладона 125 (C_2F_5H), хладона 227 (C_3F_7H), хладона 410 (C_4F_{10}), хладона 318 (C_4F_8), хладона 23 (CF_5H), хладона 218 (C_3F_8). В нашої країні такий підхід теж був на пожежному захисті музеїв, де так і залишився без «переозброєння».

В роботі [16] відмічено, що головною вимогою до використання нейтральних газів (НГ) є забезпечення того, щоб вогнегасний засіб не справляв шкідливого впливу на музейні художні цінності після завершення гасіння пожежі. Недоліками використання хладону і діоксину вуглецю окрім порушень озонового шару атмосфери є шкідливий вплив на музейні експонати, зокрема картини. Наприклад, хладон впливає на колориметричні характеристики, змінюючи кольоровість МХЦ на 3–5 порогів, а діоксин вуглецю зменшує на 10–15 % міцність основного першого шару картин.

В роботі [17] підкреслюється, що з підписанням вказаного протоколу замість озон-руйнуючих бромистих складів та діоксину в країнах Заходу цю проблему стали вирішувати за допомогою НГ Inergen IG-541 або Argonite IG-55 (суміш азоту й аргону у пропорції 1:1) та ін. Основним недоліком використання таких сумішей є їх висока вартість.

Але в Україні розробка газових сумішей на основі НГ й відповідного до них устаткування довгий час рухалось дуже повільно. Так чи інакше в нашої ще молодої, з 1991 року – незалежної України, яка останні десять років фактично знаходиться у воєнних стосунках з сусідським «братом», використання НГ «INERGEN» за своїм призначенням було не до часу. Тому зрозуміло, що після підписання Украйною того ж Монреальского протоколу (про скорочення виробництва та обмеження застосування речовин, що порушують озоновий шар Землі) виникла проблема, яка набирала своєї актуальності і зросла до невідкладної, особливо – після повномасштабного вторгненню російських військ в Україну.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є недостатня ефективність існуючих автоматичних систем газового пожежогасіння з використанням газових сумішей високої вартості та таких, що можуть зашкодити музейним експонатам.

3. Мета та завдання досліджень

Метою роботи є створення ефективної вогнегасної системи для гасіння пожеж у музеях та їх фондосховищах сумішшю нейтральних газів, що не спотворює музейні художні цінності, яка спроможна конкурувати з кращими іноземними зразками.

Для досягнення цієї мети треба вирішувати таки задачі:

– розробити лабораторний стенд випробування вогнегасної ефективності гасіння модельних пожеж нейтральними газами, як прототипу до удосконалення існуючих автоматичних систем газового пожежогасіння;

– визначити оптимальний склад суміші для ефективного об'ємного пожежогасіння з точки зору швидкості гасіння, невеликої вартості та збереження показників якості музейних художніх цінностей після гасіння.

4. Матеріали й методи досліджень

Об'єкт дослідження – варіанти сумішей негорючих газів, які використовуються у лабораторному випробувальному стенді, максимально наближеному до типового автоматичного устаткування газового пожежогасіння, за допомогою якого гасять палаючі музейні художні цінності в музеях і їх фондосховищах при пожежах.

Методи досліджень – фізичне моделювання об'ємного газового пожежогасіння на основі відомих положень теорії розвитку та припинення горіння. Також залучалися методи математичної статистики з елементами теорії планування експерименту та комп'ютерні програми обробки результатів експериментів STATISTICA 6.0, Microsoft Excel.

Предметом досліджень є підмальовки на шматочках холосту маслом та аквареллю на картонках ватману, котрі піддавалися впливу негорючих газів при моделюванні об'ємного пожежогасіння на лабораторному випробувальному стенді з використанням удосконаленого обладнання.

Гіпотеза досліджень – подібність зразків підмальовок до та після їх гасіння сумішами негорючих газів, адекватним музейним художнім цінностям, що перевірялося компаратором кольору КК – 2, а також підтвердження ідентичності запропонованого лабораторно-випробувального стенду до серійного автоматичного устаткування газового пожежогасіння, якими гасять пожежі в фондосховищах музеїв.

На відміну від закордонного та якісного, але дорожчого газу «INERGEN», для заміни вітчизняних модифікацій хладону та вуглецю, пропонується недорога суміш НГ, оптимально складеної з нейтральних газів: діоксину вулицю (CO_2), азоту (N_2) та аргону (Ar). Для його використання при гасінні розробляється устаткування для задіяння при пожежі. Названо цю композицію НГ – «CONAR», за першими літерами назв складових.

5. Розробка стенду випробувань вогнегасної ефективності гасіння модельних пожеж нейтральними газами

Щоб проводити дослідження вогнегасної ефективності різних варіантів сумішей НГ для гасіння пожеж МХЦ, перш за все нами було розроблено лабораторний випробувальний стенд (ЛВС), який максимально наближався би за конструкцією до серійних автоматичних установок газового пожежогасіння (АУГПГ), якими гасять пожежі в музеях і їх фондосховищах.

Найбільш зручним, на наш погляд, є ЛВС за схемою (рис. 1),

Випробувальна камера ЛВС доповнена контрольно-вимірювальною апаратурою, яка дозволяє за часом фіксувати параметри, що досліджуються.

Таке схемне рішення дозволяє подавати компоненти вогнегасної суміші НГ з відповідних балонів у змішувач дозовано, а вже після їх змішування задіяти суміш НГ у випробувальній камері при гасінні модельної пожежі. Для цього потрібно розрахунком узгодити об'єм змішувача з об'ємом випробувальної камери стенду, що буде показано нижче. Крім цього, таке рішення дає можливості:

– проводити дослідження із мінімальною витратою інертних газів;
– зробити гарне змішування інгредієнтів;
– утримувати реальні температурні умови під час експериментів;
– не збільшувати матеріальні витрати на проведення експериментів порівняно з роботою типовою АУГПГ.

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

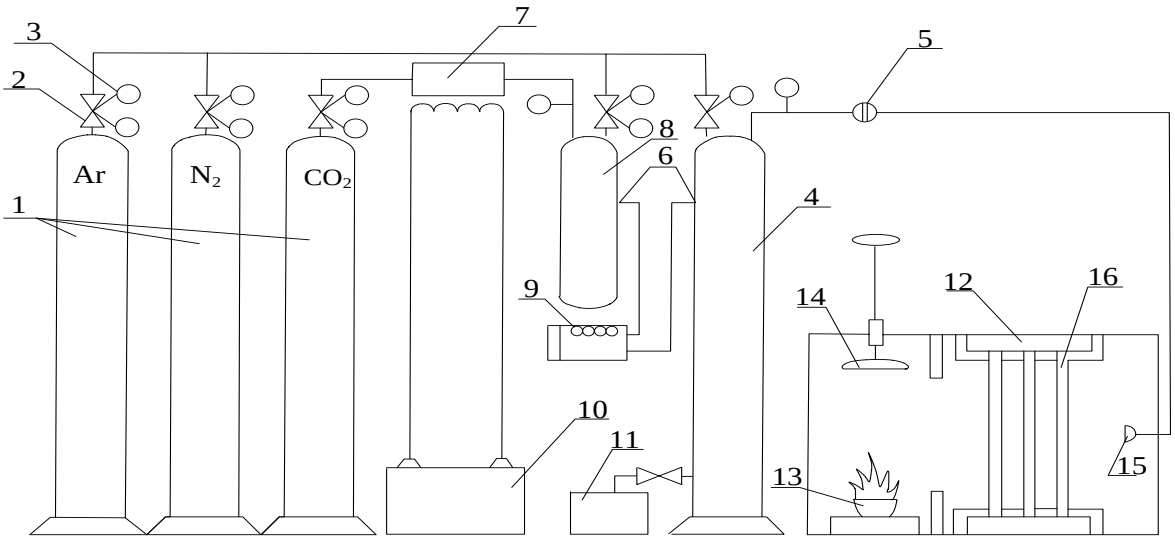


Рис. 1. Принципова схема лабораторного випробувального стенду: 1 – балон з газом; 2 – вентиль; 3 – манометр; 4 – змішувач; 5 – пробковий вентиль; 6 – термопари; 7 – випаровувач; 8 – накопичувач; 9 – регулювальний прилад; 10 – трансформатор; 11 – блок продувки; 12 – випробувальна камера; 13 – модельне вогнище; 14 – пристрій гасіння; 15 – завихрювач; 16 – зразки

Окремо, камера пожежогасіння лабораторного випробувального стенду відображена на рис 2.

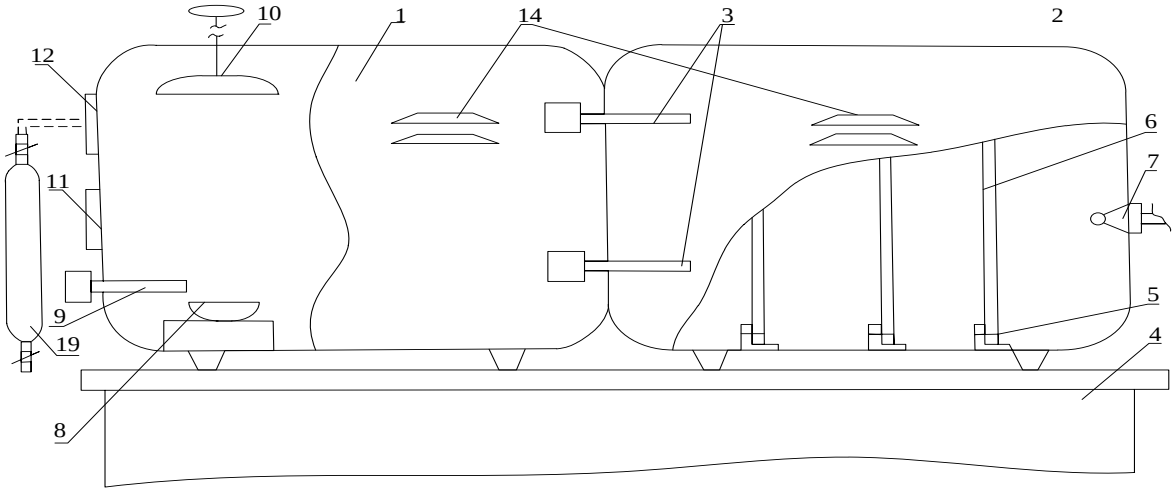


Рис. 2. Камера пожежогасіння підмальовок лабораторного випробувального стенду: 1 – рухома частина; 2 – нерухома частина; 3 – замок; 4 – тумба; 5 – тримач; 6 – рамка; 7 – завихрювач; 8 – модельне вогнище; 9 – пристрій електропідпалювання; 10 – механізм гасіння осередку пожежі; 11 – оглядове вікно; 12 – місце відбору проб; 13 – хімічна піпетка; 14 – вентиляційні отвори

Питання розрахункового об’єму змішувача для приготування сумішей НГ досить важлива, так як тиск у змішувачі й інших системах стенду знаходиться в прямої залежності від кількості газу, що там знаходиться.

Розрахунок сумарного тиску може бути виконано комплексно, однак для наших складових (CO_2, N_2, Ar) з урахуванням повітря такі розрахунки громіздкі та на практиці не зручні. Визначення шуканого тиску доцільно провести, базуючись на одній зі складових цього газового складу. В якості основної складової нами пропонується обрати аргон, який має найбільший показник адіабати η_o: η_{oAr}=1,67, η_{oN2}=1,4, η_{oCO2}=1,4. Тоді вираз для знаходження тиску наповнення ЛВС любою з

компонент НГ «CONAR» можна записати у звернутому вигляді так:

$$\frac{p_i - 1}{p_i^{\frac{-1}{\eta_0}}} + \sum_{I=1}^{I}\left(W_{OK} \cdot p_i^{\frac{-1}{\eta_0 i}} \right) = 1, \qquad (1)$$

де p_i – тиск зарядки *i*-компоненти; η_0=1,4 – показник адіабати для повітря; K=1...i, – кількість складових; i = 1...j (j – кількість компонент в суміші); η_{0i} – показник адіабати і-складової суміші.

Вираз (1) є універсальним і може бути застосований для знаходження тиску зарядки змішувача за любим з компонентів вогнегасної суміші, при необмеженій їх кількості. На підставі (1) за уточненою методикою була розрахована вхідна базова матриця експерименту (табл. 1).

Табл. 1. Базова матриця експерименту для знаходження тиску зарядки змішувача кожним з компонентів вогнегасної суміші.

№	1 агент			2 агент			3 агент		
суміші	газ	% %	P,МПа	газ	% %	P,МПа	газ	% %	P,МПа
1	Ar	40	0,26	CO_2	40	0,55	N_2	20	0,72
2	CO_2	50	0,26	Ar	30	0,42	N_2	20	0,68
3	Ar	40	0,26	N_2	30	0,5	CO_2	30	0,73
4	Ar	50	0,35	N_2	30	0,6	CO_2	20	0,76
5	Ar	60	0,45	N_2	30	0,71	CO_2	10	0,8
6	Ar	50	0,35	N_2	40	0,69	CO_2	10	0,77
7	Ar	40	2,6	N_2	40	0,58	CO_2	20	0,73
8	N_2	50	0,29	Ar	30	0,56	CO_2	20	0,71
9	N_2	50	0,29	Ar	40	0,67	CO_2	10	0,74
10	CO_2	50	0,26	N_2	30	0,47	Ar	20	0,66
11	CO_2	40	0,21	N_2	30	0,4	Ar	30	0,69
12	N_2	40	0,22	CO_2	30	0,41	Ar	30	0,7
13	N_2	40	0,22	CO_2	40	0,48	Ar	20	0,67
14	CO_2	50	0,26	N_2	40	0,54	Ar	10	0,64
15	N_2	50	0,29	CO_2	40	0,55	Ar	10	0,75
16	N_2	50	0,29	CO_2	30	0,48	Ar	20	0,68

Примітка: В подальшому відзначено, що найменший час гасіння було отримано для складу № 14 з компонентами: CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %. Безумовно і пошкодження МХЦ тут слід очікувати найменші

Залежність абсолютного тиску, відносно загального об'єму газу в установці та у змішувачі, може бути описана відомим виразом:

$$p_{абс} = \left(\frac{W}{W_з} \right), \qquad (2)$$

де W – об'єм газу, який був у змішувачі при вхідних умовах; $W_з$ – об'єм змішувача.

Індикаційне значення тиску p відрізняється від абсолютного $p_{абс}$. на величину атмосферного, тому:

$$p_{абс} = \left(\frac{W}{W_з} \right) \cdot \eta_0 - 1. \qquad (3)$$

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

Величина W, в нашому випадку, це – необхідний для проведення випробувань об'єм газу, котрий пов'язано з об'ємом камери $W_к$. В подальшому доцільно перейти до відносних величин, вводячи поняття коефіцієнта газу $К_п$ та коефіцієнта змішувача $К_з$:

$$К_п = \left(\frac{W}{W_к} \right), \quad , \quad К_з = \left(\frac{W_з}{W_к} \right). \tag{4}$$

Останні вирази можна вважати необхідною умовою існування рішення завдання, що з урахуванням (4) можна записати, як:

$$p = \left(\frac{К_п}{К_з} \right) \cdot \eta_0 - 1. \tag{5}$$

Як вже відмічалося тиск у змішувачі стенду суттєво залежить від співвідношення об'ємів камери змішувача та потрібної кількості газу для роботи. Послідовними розрахунками по узагальненим коефіцієнтам змішувача знайдено такий ряд значень $К_з$: (1 – $К_з$=0,074; 2 – $К_з$=0,4; 3 – $К_з$=0,5; 4 – $К_з$=1,0; 5 – $К_з$=1,5; 6 – $К_з$=2,0), для якого з міркувань механічної міцності, найменш слабких кріпильних елементів механіки ЛВС знаходиться межа придатного робочого тиску задіяння його камери p_m=3,5 МПа.

В підсумку маємо, що раціональний об'єм змішувача є таким, при якому робочий тиск в камері з двократним запасом міцності знаходиться в межах

$$0{,}5 \cdot p_m < p < p_m, \tag{6}$$

де p_m=3,5 Мпа – максимально припустимий тиск роботи стенду.

Таким чином конструктивне виконання ЛВС з визначенням основної вимоги до його роботи при перевірці вогнегасної спроможності гасіння нейтральними газами розроблено. Тобто вирішено перше завдання дослідження.

6. Визначення оптимального складу суміші для ефективного об'ємного газового пожежогасіння

Безумовно, реальні МХЦ, як такі, неприпустимо використовувати в наших дослідженнях. Тому й знадобилися їх фізичні замінники – зразки, так званих підмальовки.

Всесвітній досвід фондосховищ художніх музеїв показав, що найбільш придатними для проведення подібних досліджень і є зразки підмальовок з використанням пігментних фарб на рядні або на ватмані, на котрі при пожежогасінні подається НГ (як на картину). Після експериментів порівнюють показники якості зразків дослідження до і після впливу на них об'ємного пожежогасіння.

Шукаючи потім суттєві зміни в зразках, концентрували увагу на головних показниках якості. А саме: пониження кольорової насиченості та втраті світлості тону красок, що свідчить про втрату МХЦ художньої цінності. Цю частину досліджень було покладено на спеціальних експертів – фахівців цього напряму. Тому, не розглядаючи тут прискіпливо таку специфічну особливість до реальних картин, як глобальна кольорова якість складання трьох головних шарів прообразу

картини (зразки, що досліджуються при випробуваннях) скажемо так, що два з них (живописний та лаковий шари) – суттєво тонкі, й на міцність адекватної трьох-компонентної фізичної складової картини не впливають. Їх набір, може бути повний чи неповний. Інакше кажучи, кожна складова композиційної трійки має своє призначення. Перший шар – основа картини – зберігає її у первинному вигляді довгий час (іноді, століття). Другий шар – фарби картинного живопису. Цей шар, з'єднаний з першим, по своєї сутності є тим скарбом, який треба зберігати на віка. Третій поверховий, лаковий шар – захисний. Обидва перших досліджувалися нами з залученням фахівців Харківської державної академії дизайну та мистецтва. Перший – на міцність по критерію «на розрив» та остаточну деформацію при розтягуванні адекватних зразків. Другий, – з точки зору втрати його «художньої цінності». Що стосується третього шару, він оцінювався оглядово експертами харківського художнього музею. Як зрозуміло з викладеного, для проведення експериментів, щодо визнання спотворень дії НГ на МХЦ було виготовлено спеціальні полотна з підмальовками на основі найбільш чутливих до температури пігментів, а з цих полотен вирізалися зразки у вигляді полос шириною 40 мм. Різання полос було орієнтовано перпендикулярно напряму фарбового полотна. Подібним чином було виготовлено багаточисельні зразки.

Експериментальні випробування виконувалися в такій послідовності:

– готування лабораторного стенду випробувань до роботи – готування зразків до випробувань – зважування зразків з підмальовками – завантаження зразків в камеру випробувань – приготування суміші НГ – гасіння в камері модельного осередку – повторне зважування зразків з підмальовками після об'ємного гасіння – дослідження результату. Згідно розробленої раніше вхідної матриці експериментів (табл. 1) були отримані данні оцінки вогнегасної спроможності сумішей НГ та аналізу міцності підмальовок картин після їх гасіння (табл. 2). Проводилися вони таким чином: після підготовки досліджуваного газового складу, робився підпал модельного вогнища з підмальовками. Після 30 с вільного горіння з відкриттям пробкового крану у випробувальну камеру подавалась вогнегасна суміш НГ. Одночасно з цим включався секундомір і фіксувався час гасіння вогнища.

Таким чином, експерименти дозволяли здійснювати порівняльну оцінку сумішей газових складів за наступними показниками:

– спроможність та ефективність за часом гасіння модельного вогнища сумішшю НГ;

– міцність на можливий розрив і остаточну деформацію модельних зразків підмальовок при їх розтягуванні оцінювалась візуально та за обміром геометрії зразків;

– вартість задіяної для гасіння суміші НГ;

– художня якість після гасіння підмальовок.

Результати випробувань зразків з підмальовками на вогнегасну ефективність НГ та на розривне їх навантаження зведено в об'єднану табл. 2.

При гасінні модельних вогнищ тільки компонентами CO_2, N_2 та Ar окремо встановлено – вогнегасна спроможність односкладових НГ погіршується. А саме: кореляційним аналізом було отримано такі відповідні відсоткові співвідношення – $CO_2 : N_2 : Ar = 1 : 2{,}38 : 3{,}81$; за вказаною послідовністю.

Обов'язкові дослідження впливу вогнегасних сумішей газів після гасіння модельних осередків пожеж на якість зразки МХЦ цими сумішами НГ, провадилися спеціальними випробуваннями, котрі здійснювали експерти художнього фа-

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

ху з залученням спеціалістів Харківської державної академії дизайну та мистецтва. Позитивні результати досліджень торкалися уточнення змін кольорових відтінків підмальовок.

Табл. 2. Вогнегасна спроможність сумішей НГ та міцність на розтягування випробувальних зразків підмальовок

№ суміші	Складові суміші НГ, %			Час гасіння, с	Розривне зусилля , ΔР, Н
	CO_2	N_2	Ar		
1	40	20	40	5,8	1,04
2	50	20	30	5,5	1,58
3	30	30	40	7,6	1,08
4	20	30	50	7,7	1,84
5	10	30	60	11,5	0,98
6	10	40	50	5,3	2,92
7	20	40	40	5,3	2,08
8	20	50	30	8,8	2,92
9	10	50	40	9,3	1,47
10	50	30	20	5,3	0,92
11	40	30	30	6,8	1,98
12	30	40	30	7,2	1,92
13	40	40	20	6,3	1,84
14	50	40	10	4,6	0,58
15	40	50	10	4,8	0,38
16	30	50	20	5,2	3,42

Примітка. Майже з урахуванням змін щільності матеріалу основного першого шару зразків після моделювання гасіння підмальовок крайні максимуми деформацій модельних зразків знаходилися в припустимих межах і (точність вимірювань геометрії зразків в межах до 3 %)

З даних, що наведені у табл. 2 видно, що дві суміші НГ, які близькі за складом, можна вважати придатними для раціонального гасіння зразків МХЦ у найбільшій ступені. Це суміші: № 14 (CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %) та № 15 (CO_2=40 %, N_2=50 %, Ar=10 %). При чому, встановлено додатково, що при збільшенні вмісту CO_2 вогнегасна спроможність суміші НГ зростає.

Вартість готових газових сумішей, які використовувалися для гасіння модельних пожеж оцінювалася за 1 л газів, що наведено в табл. 3. З табл. 3 та рис.3 слідує, що найдешевшою з двох раціональних сумішей № 15 і № 14 при використанні є остання, зі складом: CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %.

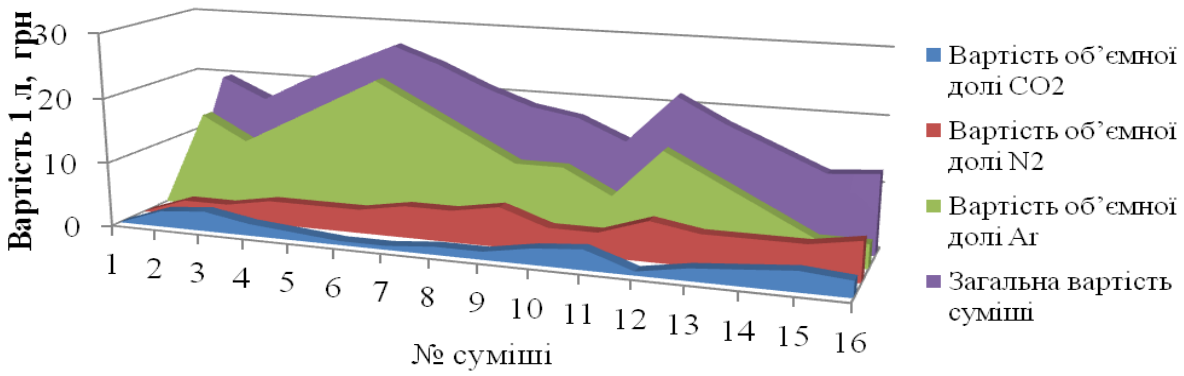


Рис. 3. Порівняння вартості складових нейтральних газів

Табл. 3. Вартість складових нейтральних газів і сумішей НГ із них

	CO_2	N_2	Ar				
Вартість 1 л, грн.	6,2	12,3	37,3				
№ суміші	Об'ємна доля			Вартість об'ємної долі на одне випробування			Сума, грн.
1	0,4	0,2	0,4	2,48	2,46	14,92	19,86
2	0,5	0,2	0,3	3,1	2,46	11,19	16,75
3	0,3	0,3	0,4	1,86	3,69	14,92	20,47
4	0,2	0,3	0,5	1,24	3,69	18,65	23,58
5	0,1	0,3	0,6	0,62	3,69	22,38	26,69
6	0,1	0,4	0,5	0,62	4,92	18,65	24,19
7	0,2	0,4	0,4	1,24	4,92	14,92	21,08
8	0,2	0,5	0,3	1,24	6,15	11,19	18,58
9	0,4	0,3	0,3	2,48	3,69	11,19	17,36
10	0,5	0,3	0,2	3,1	3,69	7,46	14,25
11	0,1	0,5	0,4	0,62	6,15	14,92	21,69
12	0,3	0,4	0,3	1,86	4,92	11,19	17,97
13	0,4	0,4	0,2	2,48	4,92	7,46	14,86
14	0,5	0,4	0,1	3,1	4,92	3,73	11,75
15	0,4	0,5	0,1	2,48	6,15	3,73	12,36
16	0,3	0,5	0,2	1,86	6,15	7,46	15,47

Таким чином, цю суміш слід вважати оптимальною, так як вона на 15 % дешевше суміші газу закордонного зразка Inergen IG-541, який використовується в аналогічних системах газового пожежогасіння.

7. Обговорення результатів оптимізація складу нейтральних газів для газового пожежогасіння

Отримані в роботі позитивні результати пояснюються двостороннім раціональним підходом до оптимального зберігання коштовних МХЦ в музеях і їх запасниках. По-перше, запропоновані рішення дають можливість удосконалити існуючі системи УАГПГ для більш ефективного гасіння можливих пожеж в місцях зберігання МХЦ та їх експозиції та зберігання МХЦ, де знаходяться художні артефакти. По-друге, – в цьому разі виникає можливість за рахунок синергічного ефекту змішувати конкретні об'єми відповідних нейтральних газів, та вибирати такі суміші НГ, які не зіпсують МХЦ, та відповідають вимогам погодженого Україною Монреальського протоколу про речовини, що виснажують озоновий шар.

Особливості запропонованого підходу полягають в тому, що завдяки апробації ЛВС створено передумови до удосконалення існуючих АУГПГ. До того ж за допомогою ЛВС зі спеціальною випробувальною камерою відкриваються можливості проведення експериментальних досліджень при розробці нових сумішей НГ для систем газового пожежогасіння.

Щодо обмежень, притаманних дослідженням в цьому напрямку, слід сказати, що для повноцінного підтвердження ефективності вогнегасної системи для гасіння пожеж у музеях та їх фондосховищах запропонованою сумішшю нейтральних газів та не пошкодження музейних художніх цінностей в результаті гасіння, необхідно провести розширені експериментальні дослідження з гасіння запропонованою сумішшю нейтральних газів, повноцінних картин різних розмірів.

Серед недоліків даного дослідження можна відзначити використання в якос-

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

ті модельного вогнища лише одного виду МХЦ, а саме підмальовок картин, які можуть бути пошкоджені при гасінні пожежі. В перспективі планується дослідити ефективність застосування запропонованої конструкції ЛВС газового гасіння, інших сумішей НГ та їхній вплив на зразки різних видів цінностей, електронного обладнання, матеріалів архівів та бібліотек. Крім цього, недоліком даного дослідження, яке неважко подолати, так це відсутність серед фахівців пожежної безпеки спеціалістів з художнього мистецтва.

Розвиток даного дослідження полягає в тому, що досвід вирішення проблеми газового пожежогасіння музейних та художніх цінностей може бути розповсюджено при захисті електронного обладнання, центрів обробки та зберігання даних (серверні), архівів, бібліотек, критичних об'єктів (АЕС, командно-диспетчерські пункти тощо) та іншого цінного майна у приміщеннях із перебуванням людей. Під час практичного впровадження та використання запропонованої суміші НГ в АУГПГ можуть виникнути труднощі, пов'язані з механізмом гасіння даним вогнегасним складом, який є газом-витіснювачем, тобто при займанні цей газ подається в приміщення, він розбавляє атмосферу в приміщенні, щоб концентрація кисню знизилася. Але ці питання не складно вирішити при проектуванні системи газового пожежогасіння, таким чином, щоб передбачити у приміщенні світлове, звукове сповіщення про використання АУГПГ, а також розраховувати затримку спрацьовування установки гасіння пожежі.

8. Висновки

1. Розроблено лабораторний стенд для випробувань вогнегасної ефективності гасіння модельних пожеж нейтральними газами, який може використовуватися, як прототип до удосконалення існуючих автоматичних установок газового пожежогасіння. В порівнянні з промисловими конструкціями існуючих автоматичних установок газового пожежогасіння, він дає можливість підвищити ефективність об'ємного газового пожежогасіння НГ до 10 % за рахунок додаткового елементу – спеціальної камери змішування суміші газів. Визначено тиск зарядки змішувача ЛВС за любим з компонентів вогнегасної суміші НГ, з міркувань механічної міцності, найменш слабких кріпильних елементів механіки ЛВС знайдена межа придатного робочого тиску задіяння його камери, яка склала 3,5 МПа.

2. Визначено оптимальний склад суміші «CONAR» для ефективного об'ємного пожежогасіння з точки зору швидкості гасіння, відносно невеликої коштовності та безумовного збереження показників якості МХЦ після гасіння, тобто – раціонального збереження артефактів. Визначено об'ємні долі суміші нейтральних газів (CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %), яка має найкращі показники вогнегасної ефективності за часом гасіння модельного вогнища 4,6 с. Отримано склад недорогої суміші, яка на 15 % дешевше суміші газу закордонного зразка Inergen IG-541, який використовується в аналогічних системах газового пожежогасіння.

Література

1. Ostapov K., Kirichenko I., Senchykhyn Y. Improvement of the installation with an extended barrel of cranked type used for fire extinguishing by gel-forming compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4(10(100)). P. 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174592

2. Ostapov K. et al. Improving the Quenching of the Undercarriage Space Due to the Adhesive Properties of Gel-Forming Compositions. Key Engineering Materials.

2022. Vol. 927. P. 53–62. doi: 10.4028/p-1su80t

3. Dubinin D. et al., Experimental Investigations of the Thermal Decomposition of Wood at the Time of the Fire in the Premises of Domestic Buildings. Materials Science Forum. 2022. 1066. P. 191–198. doi: 10.4028/p-8258ob

4. Kirkwood Clive. The Fire Disaster in the University of Cape Town's Jagger Library. Cabo. 2021. Vol. 1. P. 40–55, doi: 10.10520/ejc-cabo_v2021_n1_a5

5. ДБН В. 2. 5-56:2014 Системи протипожежного захисту.

6. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2023 року. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту. Київ, 2024. 39 с.

7. Горобчук А. Пожежна безпека сакральних об'єктів в умовах воєнного стану. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: збірник наукових праць. Львів. 2024. С. 242–244. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/13909

8. ДСТУ EN 15004-1:2014 Стаціонарні системи пожежогасіння. Системи газового пожежогасіння. Частина 1. Проектування, монтування та технічне обслуговування (EN 15004-1:2008, IDT).

9. Dubinin D. et al. Investigation of the effect of carbon monoxide on people in case of fire in a building, Ispitivanje djelovanja ugljičnog monoksida na ljude u slučaju požara u zgradi, Sigurnost. 2020. Vol. 62(4). P. 347–357. doi: 10.31306/s.62.4.2

10. Qichang Dong, Jiacheng Qi, Song Lu, Long Shi, Synergistic effects of typical clean gaseous fire-extinguishing agents. Fire Safety Journal. 2024. Vol. 147. 104206. doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104206

11. В Абхазії згоріло майже 4 тисячі полотен золотого фонду національних художників: історія багаторічного саботажу. URL: https://zaborona.com/v-abhaziyi-zgorilo-majzhe-4-tysyachi-poloten-zolotogo-fondu/

12. Російські окупанти розграбували Херсонський художній музей URL: https://hromadske.ua/posts/rosijski-okupanti-rozgrabuvali-hersonskij-hudozhnij-muzej

13. Пат. 119878 Україна, МПК A62C31/02 Насадок прихований висувний для установок газового пожежогасіння (варіанти) / Хазова Н..; заявник та патентовласник ООО «Пожтехніка» – a201701105; заяв. 11.03.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

14. Paul Papas, Changmin Cao, Wookyung Kim, Eli Baldwin, Adam Chattaway. Fire suppression using trifluoroiodomethane (CF_3I)-carbon dioxide (CO_2) mixtures. Proceedings of the Combustion Institute. 2023. Vol. 39. Issue 3. P. 3765–3773. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.257

15. Матвієнко В. М., Ковтун О. Ю. Конференція сторін Віденської конвенції про охорону озонового шару. Українська дипломатична енциклопедія, 2014. Т. 1. 760 с.

16. Qi Yang, Jiaqi Zhang, Yu Gao, Xiaomeng Zhou, Haijun Zhang. Toward better Halon substitutes: Effects of H content on pyrolytic and fire-suppressing mechanisms of ozone-friendly fluorinated alkanes. Journal of Molecular Structure. 2023. Vol. 1285. 135506. doi: 10.1016/j.molstruc.2023.135506

17. John L. Pagliaro, Gregory T. Linteris, Peter B. Sunderland, Patrick T. Baker. Combustion inhibition and enhancement of premixed methane–air flames by halon replacements. Combustion and Flame. 2015. Vol. 162. Issue 1. Pages 41–49. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.07.006

K. Ostapov*[1], *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
O. Chaplyhin*[2], *PhD, Deputy Head of the Main Department
A. Lisniak*[1], *PhD, Associate Professor, Head of Department
I. Gritsina*[1], *PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department
S. Shevchenko*[1], *PhD, Associate Professor of the Department
Yu. Gaponenko*[1], *Lecturer of the Department
Y. Krivoruchko*[1], *Lecturer of the Department
[1]National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine
[2]State Emergency Service of Ukraine in the Kharkiv region, Kharkiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF NEUTRAL GASES FOR FIRE EXTINGUISHING IN MUSEUM RESERVOIRS

An effective fire extinguishing system has been created for extinguishing fires in museum warehouses with a mixture of neutral gases that do not distort museum artistic values and are able to compete with the best foreign examples of volumetric gas fire extinguishing systems. The proportion of the gas mixture consisting of argon, nitrogen and carbon dioxide has been optimized for fire extinguishing of museum art treasures. Taking into account the requirements of the Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer, an analysis of the state of the issue and the specifics of the solution to the problem of gas extinguishing fires in art museums and their fund storages was carried out. The direction of improvement of the existing automatic volumetric fire extinguishing installations with neutral gases has been determined. An effective and relatively inexpensive composition of a mixture of neutral gases has been developed for use in volume extinguishing of possible fires in fund repositories and museums, which ensures the preservation of material and artistic-aesthetic values without their distortion. Volume fractions of two mixtures of neutral gases № 14 (CO_2=50 %, N_2=40 %, Ar=10 %) and № 15 (CO_2= 40 %, N_2=50 %, Ar=10 %) were determined, which are close by its composition and have the best fire-extinguishing efficiency indicators in terms of extinguishing time of the model fire 4.6 s and 4.8 s. A test laboratory stand was created, as an analogue of a volumetric gas fire extinguishing installation with a mixer of the components of the proposed working mixture of neutral gases, on which the indicators of the effectiveness of extinguishing model fires were worked out when extinguishing samples of various fragments of artistic underdrawings on parts of line and Whatman. The technical parameters of the working chamber of the laboratory stand are substantiated, and the rational ratio of pressures filling the stand mixer with components of a mixture of neutral gases is recognized based on its mathematical model, which makes it possible to improve existing industrial installations of various sizes. The price reduction of the proposed neutral gas is justified.**Keywords:** museum repositories, fire-extinguishing mixture of neutral gases, museum artistic values, architectural and structural and volume-planning solutions, fire protection of museums.

Keywords: museum storage facilities, fire extinguishing mixture of neutral gases, architectural, structural and spatial planning solutions, fire protection

References

1. Ostapov, K., Kirichenko, I., Senchykhyn, Y. (2019). Improvement of the installation with an extended barrel of cranked type used for fire extinguishing by gel-forming compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10(100)), 30–36. doi: 10.15587/1729-4061.2019.174592

2. Ostapov, K. et al. (2022). Improving the Quenching of the Undercarriage Space Due to the Adhesive Properties of Gel-Forming Compositions. Key Engineering Materials, 927, 53–62. doi: 10.4028/p-1su80t

3. D. Dubinin et al. (2022). Experimental Investigations of the Thermal Decomposition of Wood at the Time of the Fire in the Premises of Domestic Buildings, Materials Science Forum, 1066, 191–198. doi: 10.4028/p-8258ob

4. Kirkwood Clive. (2021). The Fire Disaster in the University of Cape Town's Jagger Library. Cabo, 1, 40–55. doi: 10.10520/ejc-cabo_v2021_n1_a5

5. DBN V. 2. 5-56:2014 Systemy protypozhezhnoho zakhystu.

6. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misiatsiv 2023 roku. (2024). Instytut derzhavnoho upravlinnia ta naukovykh doslidzhen z tsyvilnoho zakhystu, 39.

7. Horobchuk, A. (2024). Pozhezhna bezpeka sakralnykh obiektiv v umovakh voiennoho stanu. Problemy ta perspektyvy rozvytku systemy bezpeky zhyttiediialnosti, 242–244. url: https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/13909

8. DSTU EN 15004-1:2014 Statsionarni systemy pozhezhohasinnia. Systemy hazovoho pozhezhohasinnia. Chastyna 1. Proektuvannia, montuvannia ta tekhnichne obsluhovuvannia (EN 15004-1:2008, IDT).

9. D. Dubinin et al. (2020). Investigation of the effect of carbon monoxide on people in case of fire in a building, Ispitivanje djelovanja ugljičnog monoksida na ljude u slučaju požara u zgradi, Sigurnost, 62 (4), 347–357. doi: 10.31306/s.62.4.2

10. Qichang Dong, Jiacheng Qi, Song Lu, Long Shi. (2024). Synergistic effects of typical clean gaseous fire-extinguishing agents. Fire Safety Journal, 147, 104206. doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104206

11. V Abkhazii zghorilo maizhe 4 tysiachi poloten zolotoho fondu natsionalnykh khudozhnykiv: istoriia bahatorichnoho sabotazhu. Available at: https://zaborona.com/v-abhaziyi-zgorilo-majzhe-4-tysyachi-poloten-zolotogo-fondu/

12. Російські окупанти розграбували Херсонський художній музей. Available at: https://hromadske.ua/posts/rosijski-okupanti-rozgrabuvali-hersonskij-hudozhnij-muzej

13. Pat. 119878 Ukraina, MPK A62C31/02. Nasadok prykhovanyi vysuvnyi dlia ustanovok hazovoho pozhezhohasinnia (varianty). Khazova N..; zaiavnyk ta patentovlasnyk OOO «Pozhtekhnika» – a201701105; zaiav. 11.03.2016; opubl. 25.09.2017, Biul. № 18.

14. Paul Papas, Changmin Cao, Wookyung Kim, Eli Baldwin, Adam Chattaway. (2023). Fire suppression using trifluoroiodomethane (CF_3I)-carbon dioxide (CO_2) mixtures. Proceedings of the Combustion Institute, 39, 3, 3765–3773. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.257

15. Matviienko, V., Kovtun, O. (2014). Konferentsiia storin Videnskoi konventsii pro okhoronu ozonovoho sharu. Ukrainska dyplomatychna entsyklopediia, 1, 760.

16. Qi Yang, Jiaqi Zhang, Yu Gao, Xiaomeng Zhou, Haijun Zhang. (2023). Toward better Halon substitutes: Effects of H content on pyrolytic and fire-suppressing mechanisms of ozone-friendly fluorinated alkanes. Journal of Molecular Structure, 1285, 135506. doi: 10.1016/j.molstruc.2023.135506

17. John L. Pagliaro, Gregory T. Linteris, Peter B. Sunderland, Patrick T. Baker. (2015). Combustion inhibition and enhancement of premixed methane-air flames by halon replacements. Combustion and Flame, 162, 1, 41–49. doi: 10.1016/j.combustflame.2014.07.006

Надійшла до редколегії: 08.10.2024
Прийнята до друку: 13.11.2024

© К. М. Остапов, О. С. Чаплигін, А. А. Лісняк, І. М. Грицина та ін.

УДК 624.012.4

В. О. Степаненко, *викл. каф. (ORCID 0009-0001-0839-197X)*
О. М. Нуянзін, *д.т.н., доцент, нач. лаб. (ORCID 0000-0003-2527-6073)*
А. В. Перегін, *PhD, н.с. відділу (ORCID 0000-0003-2062-5537)*
Д. О. Кришталь, *к.держ.управ., викл. каф. (ORCID 0000-0003-3254-4574)*
Д. Е. Копитін, *фахів. відділу (ORCID 0000-0003-2505-9394)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГРІВУ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ З ГОФРОВАНИМ ПРОФІЛЕМ ПІД ЧАС ТЕПЛОВОГО ВПЛИВУ ПОЖЕЖІ

Проведено три експерименти з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем у малогабаритній вогневій печі та проаналізовано результати теплового впливу пожежі у контрольних точках для можливості їхнього використання під час оцінки вогнестійкості вказаних будівельних конструкцій. Обґрунтовано методику та результати експериментів з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем та дослідження температури на обігрівній та необігрівній поверхнях, у при арматурному шарі та контрольних точках. Описано етапи створення трьох малогабаритних фрагментів плити, товщиною 200 мм, із важкого бетону, із армуванням та умови їхнього зберігання. Проведення вищезазначених експериментів у малогабаритній вогневій печі, розробленій та створеній в рамках наукових досліджень університету. Механічне навантаження не застосовували; вплив проводили за стандартним температурним режимом пожежі з одностороннім нагріванням. За результатами експерименту на обігрівній поверхні зразка температура розподілялась рівномірно, досягаючи максимуму в 760 °С. Максимальні значення температури в контрольних точках становили 145 °С. Інші показники: на рівні арматури – 350 °С, необігрівній поверхні – 45 °С, Ці значення були зафіксовані на завершальній хвилині експерименту й продовжували лінійно зростати після виходу на плато. У ході огляду та аналізу було зафіксовано, що цілісність, теплоізоляційні та несучі властивості зразків залишились незмінними. Експериментальні дані визнано адекватними, оскільки відносне відхилення не перевищило 4,1 %, а критерії адекватності (Фішера, Стьюдента й Кохрена), що були розраховані, не перевищили критичних значень. Отримані дані можуть слугувати основою для моделювання температурного поля всередині плити.Ключові слова: експеримент, пожежа, фрагмент, піч, залізобетон, сталь, сталезалізобетон, плита, температура, відтворюваність

1. Вступ

Галузь будівництва постійно розвивають та вдосконалюють. Набуло широкого використання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем для облаштування перекриттів будівель різного призначення. Дані перекриття є монолітними і створюють їх безпосередньо на будівельних майданчиках. Проте, оцінювання вогнестійкості, як правило, проводять за розрахунковими методиками, що, в свою чергу, спричиняє появу похибок. Вони пов’язані з обмеженістю розрахункових методик щодо врахування особливостей матеріалу. У такому випадку неможливо гарантувати безпеку людей під час евакуації та достатній час для виконання завдань підрозділами оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час ліквідації пожеж.

Таким чином, актуальною проблемою є підвищення точності та відтворюваності результатів оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних конструкцій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідженню та вирішенню цієї проблеми у глобальному плані присвячені роботи [1–2]. У роботі [1] запропоновано експериментально-розрахункові методики для перевірки вогнестійкості основних видів будівельних залізобетонних конструкцій, за запропонованими методиками із використанням малогабаритної

вогневій печі проведено дослідження сталезалізобетонного фрагменту, що є розвитком попередніх робіт. Робота [2] розкриває удосконалену систему розміщення засобів вимірювальної техніки. В той же час присвячена лише залізобетонним стінам.

Існують вимоги щодо вогнестійкості подібних конструкцій, що регламентовано нормативними документами та процесу її оцінювання [3–5]. У цих нормативних документах передбачена можливість проведення випробувань будівельних конструкцій, зокрема плит, без застосування навантаження на зразки. Це стосується тих випадків, коли в лабораторних умовах через технічні обмеження неможливо відтворити умови навантаження. Стандарти допускають випробування як фрагментів будівельних конструкцій, так і повномасштабних елементів. Проте тестування нестандартних і великогабаритних конструкцій є складним через значні фінансові та трудові витрати, а також через обмеження розмірів випробувальних печей, які можуть бути меншими за розмір досліджуваних зразків. Крім того, такий підхід є неекологічним.

У дослідженні [6] представлено експеримент з нагрівання малогабаритних елементів залізобетонних конструкцій у компактній вогневій печі, що працює за стандартним температурним режимом пожежі, та описано процес верифікації отриманих експериментальних даних. Проте проведені дослідження стосуються виключно фрагментів колон. Робота [7] демонструє особливості конфігурації малогабаритної вогневої печі. Проте у роботі не вказано яким саме чином необхідно встановлювати сталезалізобетонні конструкції. Проте робота [8] пояснює, що для плит і стін не є стін не має суттєвої різниці орієнтація у просторі. В той же час дане дослідження стосується лише залізобетонних плит. У роботі [9] розглянуто сталезалізобетонні плити з армуванням ребер вертикальними сталевими листами та проаналізовано результати їх експериментальних досліджень зміни їхньої міцності. Проте, не містить досліджень особливостей прогрівання внутрішніх шарів під час нагріваня за умов пожежі. За результатами представленими у [10] встановлено, що оцінювання вогнестійкості, обраних для обчислювального експерименту, сталезалізобетонних плит протягом 120 хв теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі не настає. Проте не вказано яким чином враховують особливості матеріалів, що входять до складу залізобетону та якість металу гофрованого профілю.

Враховуючи викладене вище, у представлених роботах недостатня увага приділена особливостям прогрівання сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем під час теплового впливу пожежі, тому доцільно провести експериментальні дослідження та проаналізувати отримані результати.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи було проведення експериментів з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем у малогабаритній вогневій печі та аналіз результатів теплового впливу пожежі у контрольних точках для можливості їхнього використання під час оцінювання вогнестійкості вказаних будівельних конструкцій.

Для досягнення мети дослідження, було поставлено та успішно вирішено наступні завдання:

- обґрунтувати методику проведення експериментальних досліджень та місць точкових замірів температури під час нагрівання досліджуваних зразків;

© В. О. Степаненко, О. М. Нуянзін, А. В. Перегін, Д. О. Кришталь та ін.

- проаналізувати результати вогневого випробування та отриманих даних експериментів;

- перевірити адекватність отриманих результатів.

4. Матеріали та методи дослідження

Для проведення експерименту використовували малогабаритну вогневу піч (установку), спеціально створену для створення теплового впливу пожежі на будівельні конструкції [1–2].

Фрагменти сталезалізобетонних плит з гофрованим профілем (далі – фрагменти), номінальною товщиною 200 мм та розміром 1200×1200 мм були виготовлені заздалегідь до проведення випробування. Рецептуру виготовлення зразка взято відповідно до роботи [1] для забезпечення можливості порівняння отриманих результатів з раніше опублікованими даними. Пропорції сталезалізобетонного фрагмента такі: на 1 м^3 – портландцемент марки «500» – 460±10 кг; пісок кварцовий – 660 ± 10 кг; щебінь гранітний – 1150 ± 10 кг; вода. Водо-цементне співвідношення: 0,3 × (вода – 138 ± 10 кг); з однаковими фракціями середнього розміру гранітного заповнювача (щебінь) – 10–20 мм.

Складники були дозовані за допомогою заводських вагових дозаторів. Бетонну суміш перемішували у бетономішалці вільного падіння з об’ємом 0,75 м³, а ущільнення здійснювали за допомогою глибинних вібраторів.

Профіль: Суцільний несучий сталевий профільний лист марки Н-114, товщиною 0,7 мм, покриття: ZN (Цинк).

Армування було виконано згідно з вимогами для будівництва конструкцій гофрованих плит, призначених для адміністративних і житлових будівель. Використано арматурний дріт класу Вр-І Ø 5 мм. Фрагменти виготовляли із застосуванням стандартної розбірної дерев’яної опалубки, в якій зразки було витримано протягом семи днів. Після розпалубки фрагменти додатково зберігалися 28 діб для набуття міцності. По завершенні цього періоду зразки утримували в нормальних умовах вологості та температури до моменту старту випробувань.

На рис. 1 наведено фотографію процесу виготовлення зразка № 1. Процес встановлення відображений на рис. 2.

Зразки зберігали в критому та добре вентильованому приміщенні. Транспортування проводили безпосередньо перед проведенням випробувань. Для цього їх встановлювали в малогабаритну вогневу піч та поводили нагрівання.

5. Експериментальні дослідження з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит у малогабаритній вогневій печі

5.1. Методика проведення експериментальних досліджень

Методика випробувань полягала у впливі стандартного температурного режиму пожежі на фрагмент сталезалізобетонної плити з одностороннім нагріванням з боку гофрованого профілю (з нижньої частини плити). Отримані дані використовуватимуться для розрахункової оцінки межі вогнестійкості повнорозмірної конструкції під навантаженням.

Експерименти було проведено на навчальному комплексі практичної підготовки фахівців Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту НУЦЗ України в с. Свидівок, Черкаського району, Черкаської області.

Рис. 1. Виготовлення фрагменту сталезалізобетонних плити

Рис. 2. Фрагмент сталезалізобетонної плити з гофрованим профілем, підготовлений до випробувань: 1 – бокові стінки камери вогневої печі; 2 – фрагмент сталезалізобетонної плити для проведення випробувань

Параметри зафіксовані перед початком випробувань:

- Дата: 09.05.2024.
- Температура повітря: 26 ± 1 °C.
- Вологість повітря: 58 %.
- Вітер: північний, 1–3 м/с.

Перед випробуванням було заміряно габаритні розміри та товщину зразків. Підготовлено три зразки різних розмірів:

- Зразок 1: 1197 × 1199 мм;
- Зразок 2: 1192 × 1196 мм;
- Зразок 3: 1196 × 1194 мм.

© В. О. Степаненко, О. М. Нуянзін, А. В. Перегін, Д. О. Кришталь та ін.

Фрагменти закріплювали у фронтовій частині установки. Верхню частину камери печі закрили кришкою, а для щільного прилягання використовували фольговану мінеральну вату. На рис. 3 представлено загальну схему встановлення зразка та додаткових технічних засобів для проведення досліджень.

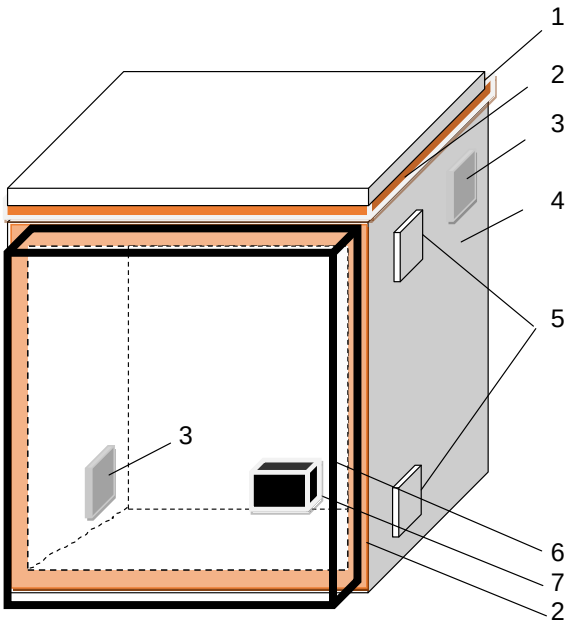


Рис. 3. Схема встановлення випробувального обладнання: 1 – панель, що закриває верхню частину камери печі; 2 – ущільнювач; 3 – пальники для створення температурного режиму у камері печі; 4 – огородження печі; 5 – місця для встановлення пальників; 6 – досліджуваний зразок будівельної конструкції; 7 – отвір виходу пічних газів

Під час нагрівання фрагмента застосовували два пальники, встановлені у верхній та нижній частинах дальнього боку установки. Таким чином факели полум'я знаходились на відстані 80 см від зразка (рис. 3). Інші 2 отвори для пальників на час випробувань були закладені цеглою і ущільнені мінеральною ватою, щоб запобігти витоку пічних газів через них.

Перед стартом початком випробувань були встановлені датчики контролю температури у вигляді термопар у камері вогневої печі на зразку та всередині нього (рис. 4):

– з метою контролю температурного режиму та його відповідності стандартному у камері вогневої печі було розміщено три термопари;

– по три термопари встановлено на рівні арматури та на обігрівальній поверхні зразка;

– п'ять терморезисторів із діапазоном вимірювання 0–300 °С розміщено на необігрівальній поверхні;

– два терморезистори встановлено у контрольних точках всередині перерізу плити.

Перед початком випробувань були встановлені та пронумеровані датчики контролю температури наступним чином (рис. 4):

– термопари T_{o1} – T_{o3} розташовано на обігрівній поверхні зразка;

– терморезистори $T_{н1}$ – $T_{н3}$ встановлено на необігрівній поверхні;

– термопари T_{a1} – T_{a3} розміщено на рівні арматури (на глибині 0,03 м від поверхні);

– терморезистори $T_{к2}$ – $T_{к3}$ розташовано у контрольних точках на глибині 0,1 м від поверхні.

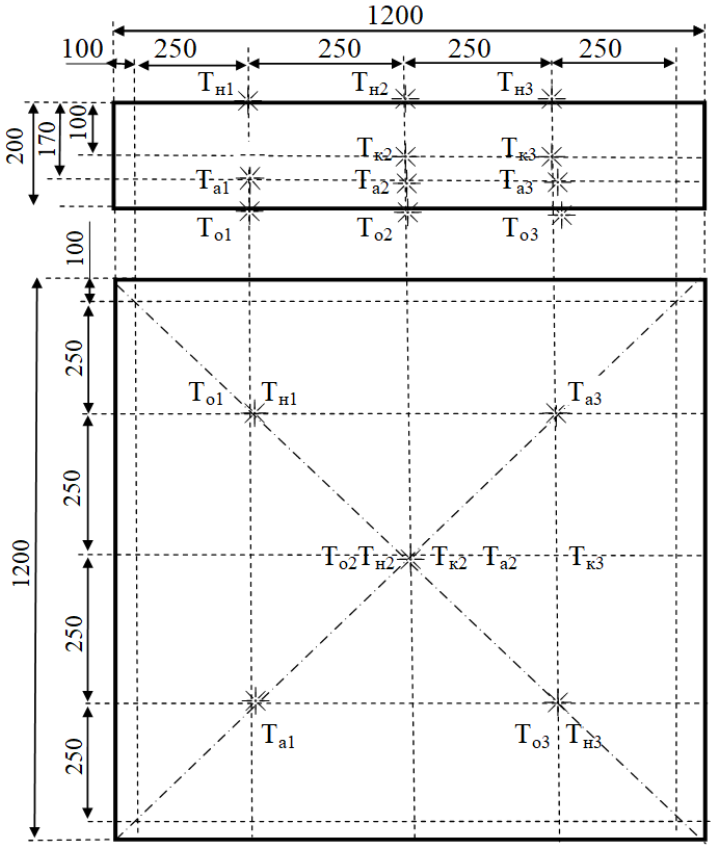


Рис. 4. Схема розташування датчиків контролю температури в перерізі фрагменту

Відповідно до розробленої методики, усі датчики контролю температури мають бути встановлені заздалегідь. Через специфіку одностороннього нагрівання необхідно враховувати всі три основні критерії вогнестійкості, тому температуру на необігрівній стороні слід вимірювати щонайменше у п’яти точках, рівномірно розосереджених по площі.

Щодо оцінки цілісності, у разі випробування фрагментів можливе візуальне спостереження: при появі тріщин на поверхні можна вважати, що цілісність порушена.

Під час експерименту використовувались метрологічні прилади та засоби, подібні до тих, що описані в роботах [8].

5.2. Результати експериментів та їхній аналіз

У ході випробувань здійснювали фото- та відеофіксацію експерименту. На рис. 5 наведено загальне фото, зроблене під час проведення експерименту.

Згідно з показниками нагрівання термопар (рис. 6), лінійна швидкість нагрівання камери печі відповідає стандартній температурній кривій пожежі й перебуває в межах норми [3]. При досягненні температури 940 °С було встановлено стаціонарний режим завдяки регулюванню потужності нагрівання печі. Тривалість випробувань склала 63 хв. У процесі нагрівання сталезалізобетону розпочалася деструкція матеріалу з виділенням вологи та пари, що містилися всередині.

На рисунках 7–10 представлено результати показників термопар на обігрівній і необігрівній поверхнях, на рівні арматури, а також у контрольних точках.

Відповідно до результатів контролю температурного режиму він відповідав стандартному, що представлено на рис. 6.

© В. О. Степаненко, О. М. Нуянзін, А. В. Перегін, Д. О. Кришталь та ін.

Рис. 5. Вигляд малогабаритної вогневої печі перед початком випробувань

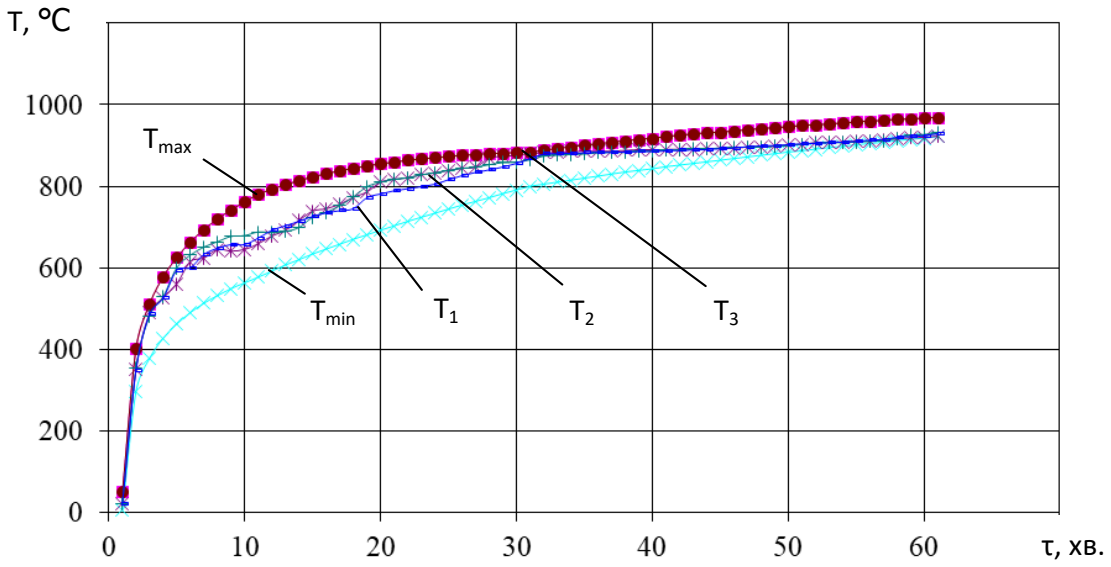


Рис. 6. Лінійна швидкість нагрівання камери печі під час випробування фрагмента: T_{min}, T_{max} – граничні межі випробувань за стандартним температурним режимом пожежі [2]; T_1, T_2, T_3 – показники термопар у ході вогневих випробувань

Дослідження тривало 60 хв оскільки після цього температурний режим наближається до стаціонарного. В результаті огляду та аналізу не було виявлено втрати цілісності, теплоізоляційної та несучої здатності зразків.

5.3. Перевірка адекватності отриманих даних

Для оцінки адекватності результатів експериментів було здійснено верифікацію в контрольних точках згідно з рекомендаціями досліджень [1–2]. Узагальнені результати розрахунків критеріїв адекватності наведено в табл. 1.

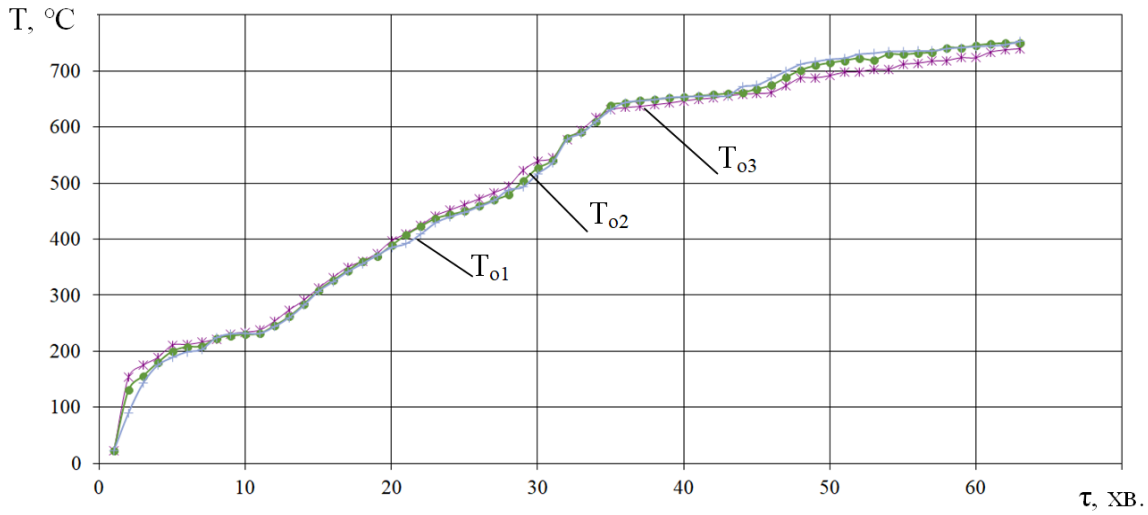


Рис. 7. Дані замірів на обігрівній поверхні плити: T_{o1}–T_{o3} – показники термопар

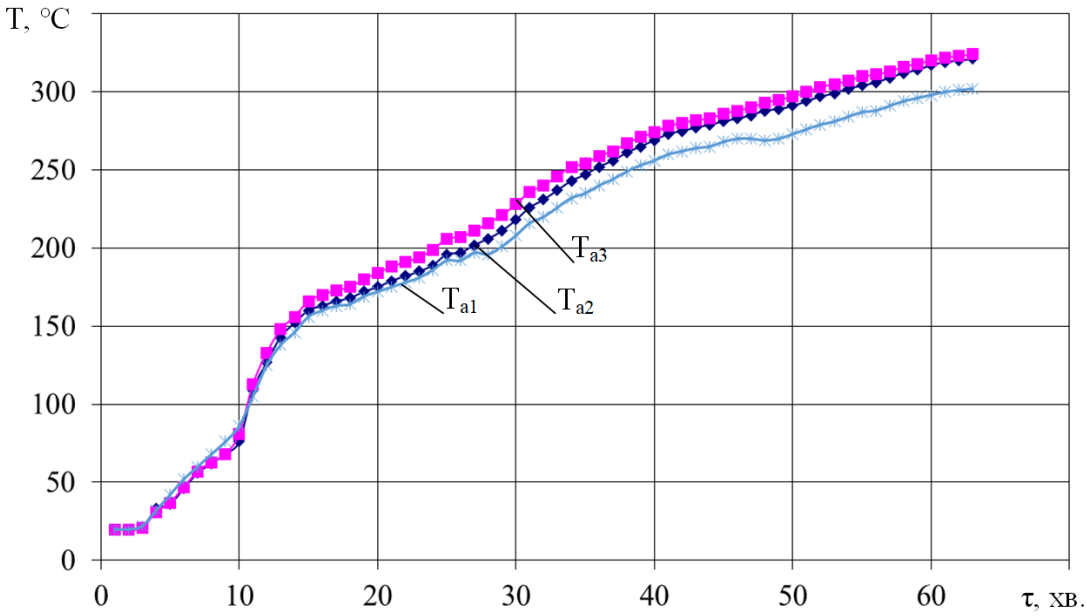


Рис. 8. Дані замірів на рівні арматури всередині плити: T_{a1}–T_{a3} – показники термопар

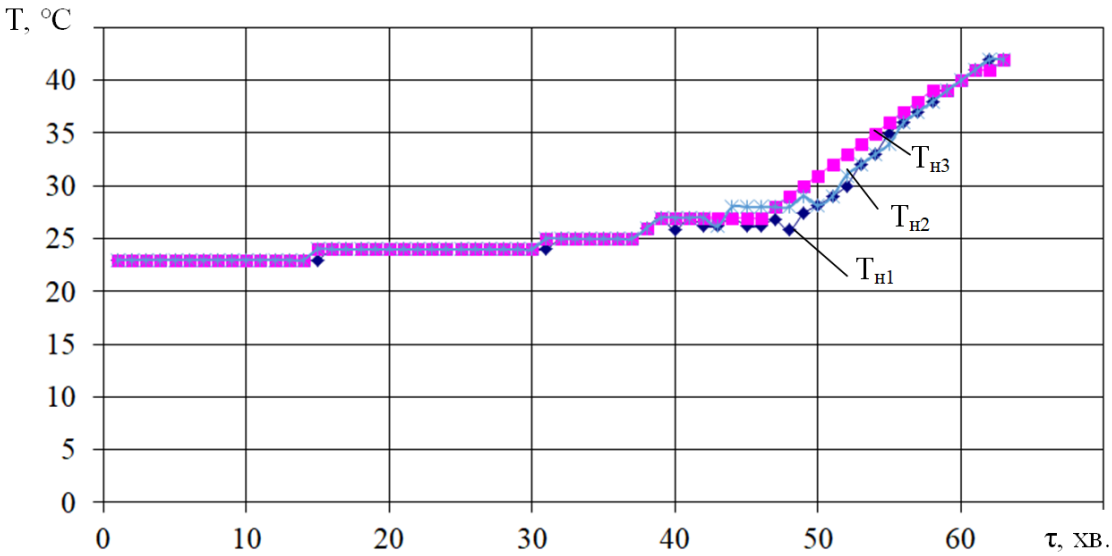


Рис. 9. Дані замірів на необігрівній поверхні плити: $T_{н1}$-$T_{н3}$ – показники термопар

© В. О. Степаненко, О. М. Нуянзін, А. В. Перегін, Д. О. Кришталь та ін.

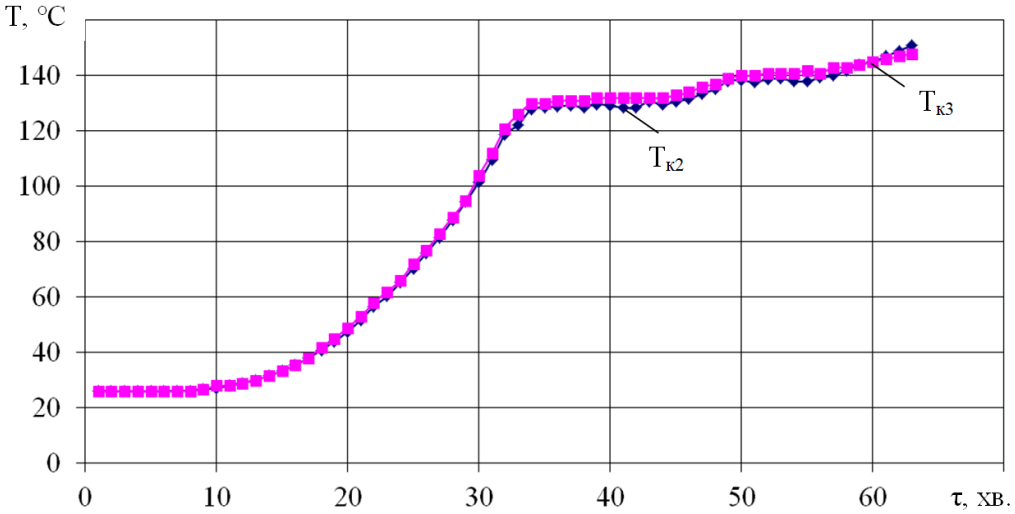


Рис. 10. Дані замірів у контрольних точках плити (серединний переріз): $T_{к2}$, $T_{к3}$ – показники термопари

5.3. Перевірка адекватності отриманих даних

Для оцінки адекватності результатів експериментів було здійснено верифікацію в контрольних точках згідно з рекомендаціями досліджень [1–2]. Узагальнені результати розрахунків критеріїв адекватності наведено в табл. 1.

Табл. 1. Кількісні показники дисперсії результатів вогневих випробувань відповідно до результатів проведених експериментів

Термопара / терморезистор (рис. 4)	Максимальне відхилення, °С	Середнє відхилення, °С	Відносне відхилення, %	F-критерій	Критичне значення F-крит.	t-критерій	Критичне значення t-крит.	Q-критерій	Критичне значення Q-крит.
$T_{к1}$	17,6	6,9	2,8	1,26	4,49	1,19	2,92	0,07	0,45
$T_{к2}$	22,6	9,2	4,1	1,42		1,36		0,13	

Як показано в табл. 1, відносне відхилення становить не більше 4,1 %, а обчислені критерії адекватності (Фішера, Стьюдента та Кохрена) є нижчими за критичні значення, що підтверджує достовірність експериментальних даних.

6. Обговорення результатів експериментальних досліджень з нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит

Отримані результати нагрівання фрагментів сталезалізобетонних плит з одностороннім нагріванням з боку гофрованого профілю під час впливу стандартного температурного режиму пожежі засвідчили рівномірність прогріву внутрішніх шарів, що зумовлено рівномірністю прогріву камери малогабаритної вогневої печі.

На основі аналізу даних, отриманих у результаті експериментів (рис. 7–10), виділено наступні особливості:

– температура у камері печі під час нагрівання фрагментів відповідала стандартному температурному режиму пожежі [3].

– під час нагрівання стале залізобетону (залізобетону) спостерігався процес виділення вологи та пари з матеріалу: на обігрівній поверхні цей процес тривав з 7 до 12 хв (рис. 7), на рівні арматури – з 19 до 28 хв (рис. 8), а у контрольних точках – з 32 до 46 хв (рис. 10).

– площини у конструкціях прогрівались рівномірно відносно відстані від поверхні нагрівання (рис. 7–10);

– на останній хвилині експерименту на рівні арматури максимальна температура склала 350 °С та продовжувала лінійно зростати;

– на останній хвилині експерименту максимальна температура у контрольних точках досягла 145 °С та лінійно зростала.

– на останній хвилині експерименту максимальна температура на необігрівній поверхні досягла 45 °С та також зростала лінійно.

– було проведено верифікацію даних для підтвердження достовірності отриманих результатів.

– отриманих даних достатньо для подальших розрахунків температурних полів всередині конструкції та оцінки її вогнестійкості.

Загалом було проведено три експерименти за стандартним температурним режимом пожежі у малогабаритній установці. Для цього було використано три фрагменти, виготовлені з ідентичних матеріалів за однакових умов. Відносне відхилення результатів не перевищило 4,1 %, а розраховані критерії адекватності (Фішера, Стьюдента та Кохрена) виявилися нижчими за критичне значення.

Вихідні дані експериментального дослідження можуть слугувати основою для відтворення температурного поля усередині плити, що дасть можливість вирішити задачу міцності та оцінити вогнестійкість великогабаритних конструкцій та є перспективою подальших досліджень даної роботи.

7. Висновки

1. Обґрунтовано методику підготовки та проведення експериментальних досліджень з нагрівання фрагментів плит зі сталезалізобетону. Суть експериментів полягала у впливі стандартного температурного режиму пожежі на фрагменти номінальним розміром 1200×1200 мм за допомогою малогабаритної вогневої установки. Це дозволяє досліджувати тепловий вплив на будівельні конструкції без додаткового механічного навантаження, забезпечуючи одностороннє нагрівання. Було описано засоби вимірювальної техніки та особливості їхнього розміщення. З метою контролю температури в камері вогневої печі було використано термопари ТХА-2388, що забезпечують вимірювання у діапазоні від 0 до 1300 °С. Для температурних вимірювань усередині досліджуваного зразка використовувалися терморезистори MF 52, які функціонують у межах від –30 до 300 °С.

2. Проаналізовано результати експериментів. Відбувався рівномірний розподіл температури на обігрівній поверхні досліджуваного фрагмента, де максимальна температура досягла 760 °С. Температура у контрольних точках склала 145 °С, на необігрівній поверхні – 45 °С, а на рівні арматури – 350 °С. Ці показники спостерігалися на останній хвилині експерименту та продовжували лінійно зростати.

3. Адекватність експериментальних даних була підтверджена методами математичної статистики: відносне відхилення не перевищило 4,1 %, а

розраховані критерії адекватності (Фішера, Стьюдента та Кохрена) не перевищили критичних значень, що відповідає вимогам до точності. Це дозволяє використовувати отримані дані для подальшого моделювання температурного поля всередині плити, що відкриває перспективи для наступних досліджень у рамках цієї роботи.

Література

1. Нуянзін О. М. Розвиток наукових основ оцінювання вогнестійкості залізобетонних будівельних конструкцій з використанням малогабаритних модульних вогневих печей. Дис. ... д.т.н. : 21.06.02, Львів: Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, 2023. 418 с. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20657

2. Перегін А. В. Удосконалення експериментально-розрахункового методу оцінювання межі вогнестійкості несучих залізобетонних стін. Дис. ... д-р філософії : 261, Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2024. 162 с. https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/9/9/7/2/4/9/disertaciia-alini-peregin-udoskonalennia-eksperimentalno-rozraxunkovogo-metodu-ociniuvannia-mezi-vognestiikosti-nesucix-zalizobetonnix-stin.pdf

3. ДСТУ EN 1363-1:2023 Випробування на вогнестійкість. Частина 1. Загальні вимоги (EN 1363-1:2020, IDT).

4. ДБН В.1.1-7-2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги».

5. ДСТУ Б В.1.1-20:2007 Захист від пожежі. Перекриття та покриття. Метод випробування на вогнестійкість (EN 1365-2:1999, NEQ).

6. Nuianzin O. et al. Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. Strength of Materials and Theory of Structures. 2024. № 112. P. 202–208. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20748

7. Перегін А. В., Нуянзін О. М. Етапи створення прототипу вогневої установки для визначення температурних розподілів малогабаритних фрагментів залізобетонних конструкцій. «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідування» : зб. наук. праць. Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2021. Т.5. № 2. С. 75–82. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21262

8. Нуянзін О. М., Борисова А. С. Розрахункове оцінювання межі вогнестійкості залізобетонної плити за результатами вогневих випробувань без механічного навантаження. Цивільна безпека: державне управління та антикризовий менеджмент. Київ: ІДУНДЦЗ. 2023. № 1(2). С. 25–40. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20741

9. Стороженко Л. І., Іванюк А. В., Клестов О. В. Експериментальні дослідження сталезалізобетонних плит з армуванням ребер вертикальними сталевими листами. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава : ПолтНТУ. 2012. Вип. 3(33). С. 249–255. https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/8468

10. Некора, В. С., Сідней, С. О., Некора, О. В., Шналь, Т. М. Поведінка сталезалізобетонної плити при пожежі. Проблеми надзвичайних ситуацій: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НУЦЗ України. 2022. С. 34–35. https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/2.pdf#page=35

V. Stepanenko, *Lecturer of the Department*
O. Nuianzin, *DSc, Associated Professor, Head of the Laboratory*
A. Perehin, *PhD, Researcher of the Scientific Department*
D. Kryshtal, *PhD in Governance, Lecturer of the Department*
D. Kopytin, *Specialist of the Scientific Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

RESULTS OF THE HEATING OF REINFORCED CONCRETE SLABS WITH A CORRUGATED PROFILE DURING THE THERMAL EFFECT OF FIRE

Three experiments were conducted on heating fragments of reinforced concrete slabs with a corrugated profile in a small-sized installation and the results of the thermal effect of fire at control points were analyzed for the possibility of their use when assessing the fire resistance of the specified building structures. The methodology and results of experiments on heating fragments of reinforced concrete slabs with a corrugated profile and the study of the temperature on heated and unheated surfaces, in the reinforcement layer and at control points were substantiated. Conducting the above-mentioned experiments in a small-sized installation for the study of the thermal effect of fire on building structures without mechanical load consisted in the effect of the standard temperature regime of fire with one-sided heating. To measure the temperature in the furnace and in the investigated fragments, thermocouples were used, which can be used to measure temperatures in the range from 0 to 1300 ℃ and thermistors to measure temperatures in the range from -30 to 300 ℃. According to the conducted experiment, there was a uniform distribution of temperatures on the heating surface of the studied small fragment, the maximum temperature reached was 760 ℃. Maximum temperatures: at control points it was 145 ℃; on the unheated surface it was 45 ℃, and at the level of the armature – 350 ℃. Studies are limited to 60 minutes, since the temperature can then approach the stationary one. The adequacy of the experimental data was confirmed: the relative deviation did not exceed 4.1 %, and the calculated adequacy criteria (Fisher, Student and Cochrane) were below the critical value. The initial data of the experimental study can serve as the basis for reproducing the temperature field inside the slab.

Keywords: experiment, fire, fragment, furnace, reinforced concrete, steel, steel-reinforced concrete, stove, temperature, reproducibility

References

1. Nuianzin, O. M. (2023). Rozvytok naukovykh osnov otsinyuvannya vohnestiykosti zalizobetonnykh budivel′nykh konstruktsiy z vykorystannyam malohabarytnykh modul′nykh vohnevykh pechey. Dys. ... d-r. tekhn. nauk : 21.06.02, L′viv: L′vivs′kyy derzhavnyy universytet bezpeky zhyttyediyal′nosti, 418. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20657

2. Perehin, A. V. (2024). Udoskonalennya eksperymental′no-rozrakhunkovoho metodu otsinyuvannya mezhi vohnestiykosti nesuchykh zalizobetonnykh stin. Dys. ... d-r filosofiyi : 261, Cherkasy: CHIPB im. Heroyiv Chornobylya NUTSZ Ukrayiny, 162. Available at: https://chipb.dsns.gov.ua/upload/1/9/9/7/2/4/9/disertaciia-alini-peregin-udoskonalennia-eksperimentalno-rozraxunkovogo-metodu-ociniuvannia-mezi-vognestiikosti-nesucix-zalizobetonnix-stin.pdf

3. DSTU EN 1363-1:2023. (2023). Vyprobuvannya na vohnestiykist′. Chastyna 1. Zahal′ni vymohy (EN 1363-1:2020, IDT).

4. DBN V.1.1-7-2016. (2016). «Pozhezhna bezpeka ob″yektiv budivnytstva. Zahal′ni vymohy».

5. DSTU B V.1.1-20:2007. (2007). Zakhyst vid pozhezhi. Perekryttya ta pokryttya. Metod vyprobuvannya na vohnestiykist′ (EN 1365-2:1999, NEQ).

6. Nuianzin, O., Kozak, A., Yanishevskyi, V., Kryshtal, V. (2024). Study of the thermal effect of fire on fragments of reinforced concrete columns based on the results of experimental tests. Strength of Materials and Theory of Structures, (112), 202–208.

 © В. О. Степаненко, О. М. Нуянзін, А. В. Перегін, Д. О. Кришталь та ін.

7. Perehin, A., Nuianzin, O. (2021). Etapy stvorennya prototypu vohnevoyi ustanovky dlya vyznachennya temperaturnykh rozpodiliv malohabarytnykh frahmentiv zalizobetonnykh konstruktsiy. Nadzvychayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likviduvannya, 5(2), 75–82. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/21262

8. Nuianzin, O., Borysova, A. (2023). Rozrakhunkove otsinyuvannya mezhi vohnestiykosti zalizobetonnoyi plyty za rezul′tatamy vohnevykh vyprobuvan′ bez mekhanichnoho navantazhennya. Civil security: Public administration and crisis management, (1(2)), 25–40. http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/20741

9. Storozhenko, L. I., Ivanyuk, A. V., Klestov, O. V. (2012). Eksperymental′ni doslidzhennya stalezalizobetonnykh plyt z armuvannyam reber vertykal′nymy stalevymy lystamy. Available at: https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/8468

10. Nekora, V. S., Sidney, S. O., Nekora, O. V., Shnal, T. M. (2022). Povedinka stalezalizobetonnoyi plyty pry pozhezhi. Redaktsiyna kolehiya, 34. Available at: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/konferentsii/2022/2.pdf#page=35

Надійшла до редколегії: 09.10.2024
Прийнята до друку: 14.11.2024

УДК 614.841

Р. І. Коваленко, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-2083-7601)*
А. Я. Калиновський, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)*
С. Ю. Назаренко, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-0891-0335)*
М. М. Журавський, *к.т.н., доцент, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0001-8356-8600)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ У ВЕЛИКИХ І СЕРЕДНІХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ УКРАЇНИ

Досліджено процес виникнення пожеж в населених пунктах України з чисельністю населення від 50 до 500 тисяч осіб за період з 2021 по 2023 рік. Перевірено статистичну гіпотезу про те, що процес виникнення пожеж в населених пунктах може бути описаний статистичними закономірностями. Встановлено, що процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах України у більшості випадків може бути описаний статистичними закономірностями. Виявлено, що за період 2021 року процес виникнення пожеж міг бути описаний пуассонівським та геометричним законами розподілу, що у відсотковому співвідношенні становить 44 % та 58 % випадків відповідно. Траплялися також випадки, коли по окремим населеним пунктам вказаний процес міг бути описаний відразу двома законами розподілу, що у відсотковому відношенні складає 26 % випадків і є не досить зрозумілим. Не вдалося встановити жодного закону розподілу для 24 % з числа досліджуваних населених пунктів. За період 2022 та 2023 року процес виникнення пожеж міг бути описаний пуассонівським, геометричним та експоненційним законами розподілу, що у відсотковому співвідношенні для періоду 2022 року становить 36 %, 64 % та 6 % випадків, а для періоду 2023 року – 36 %, 58 % та 2 % випадків відповідно. Випадків, коли названий процес можна було відразу описати декількома законами розподілу для періоду 2022 року становить 24 %, а для періоду 2023 року – 16 %. Не вдалося встановити жодного закону розподілу за період 2022 року для 20 % відсотків серед досліджуваних населених пунктів, а за період 2023 року цей показник становив також 20 %. В подальшому планується дослідити рівень достовірності прогнозів кількості пожеж при використанні відомих методів прогнозування під час воєнного стану.

Ключові слова: пожежа, воєнний стан, статистична гіпотеза, закон розподілу, аварійно-рятувальне формування, критерій Пірсона

1. Вступ

Важливе значення для успішного реагування аварійно-рятувальних формувань на надзвичайні ситуації і небезпечні події, які пов’язані із виникненням пожеж має їх точний прогноз кількості. В умовах оперативної обстановки, яка змінюється, а особливо у період воєнного стану виконати достовірний прогноз кількості пожеж достатньо складно, бо виникає потреба у попередньому встановленні статистичних закономірностей, які дозволяють це описати. На кількість пожеж, які виникають в населених пунктах в період воєнного стану впливають різні чинники, зокрема, чисельність населення та інтенсивність обстрілів території. Недостовірний прогноз кількості пожеж на майбутній період може стати причиною неправильної оцінки чисельності сил та засобів, які будуть потрібні для реагування на них.

Отже, дослідження закономірностей виникнення пожеж під час воєнного стану є актуальними. Результати цих досліджень можуть бути використані для розробки методів прогнозування їх кількості.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [1] проведено огляд причин виникнення пожеж і їх наслідків в населених пунктах південної Європи. Відмічається, що на процес виникнення пожеж впливають зміна клімату, зростання чисельності населення та щільності житлової за-

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

будови, а також межування населених пунктів з лісами та сільськогосподарськими угіддями. Питання визначення статистичних закономірностей виникнення пожеж в цій роботі не розглядалося.

В [2] для дослідження пожеж пропонується використовувати супутникові знімки певної місцевості у поєднанні з геоінформаційними системами. Це дає можливість відслідкувати динаміку розвитку пожежі і потім ці дані зберігати у базі даних. З допомогою створеної бази даних при виявленні загорянь на поверхні землі з використанням супутника можна спрогнозувати подальший розвиток пожежі. Достовірність вказаного способу було перевірено на прикладі прогнозування розвитку лісових пожеж при цьому пожежі в населених пунктах не розглядалися.

В [3] проаналізовано пожежі на транспорті, які траплялися в автодорожніх тунелях Китаю, котрі також розміщуються на території населених пунктів. Більшість з пожеж траплялися на в'їздах і виїздах з автодорожніх тунелів, а найбільш частою причиною пожеж були технічні несправності транспортних засобів. Також була встановлена сезонна залежність кількості пожеж. Влітку і взимку відбувалася найбільша кількість пожеж, а навесні і восени найменша.

В [4] пропонується метод для виявлення і прогнозування пожеж, який ґрунтується на застосуванні технологій розумного міста. Досягається це шляхом використання пристроїв, які дозволяють виявляти температуру, дим, полум'я та інші чинники, а також систем і засобів штучного інтелекту. З одного боку вказаний метод дозволяє виявляти пожежі через зміну вказаних раніше параметрів середовища, а з іншого боку проводити прогноз пожеж на основі відомостей, які зберігаються в базі даних з використанням систем і засобів штучного інтелекту. Відповідно для формування прогнозу на майбутній період необхідно мати зібрану інформацію про пожежі за попередній період.

В [5] для прогнозування пожеж в населених пунктах попередньо було досліджено статистичні дані про них за період останніх п'яти років. На основі цих даних проведено навчання нейронної мережі і в подальшому використано її для прогнозування. У підсумку отримано достатньо достовірний прогноз кількості пожеж на наступний період. Поряд з цим вказаний метод прогнозування є достатньо суперечливим щодо його достовірності враховуючи алгоритми роботи нейронних мереж.

В [6] для прогнозування викликів в населених пунктах, зокрема, пов'язаних з пожежами і визначення ймовірності залучення на їх обслуговування певної кількості відділень аварійно-рятувальних формувань був використаний закон розподілу Пуассона. З урахуванням вказаного прогнозу стало можливим виконати перерозподіл підрозділів по території населеного пункту для того щоб вони могли швидко відреагувати на виклики, які трапляються достатньою кількістю сил та засобів. Перед використанням цього методу прогнозування попередньо довелося опрацювати масив статистичних даних щодо залучення на виклики аварійно-рятувальних формувань за період десяти останніх років. Варто зауважити, що ці дані були зібрані у мирний час, тому стверджувати про те, що пуассонівський закон розподілу можна буде використати і під час воєнного стану не варто поки не буде перевірена названа статистична гіпотеза.

Методи прогнозування, які ґрунтуються на законі розподілу Пуассона використовуються не лише для визначення кількості пожеж на майбутній період, а також і для чисельної оцінки ймовірності виникнення нещасних випадків.

В [7] для прогнозування кількості нещасних випадків на будівництві було

використано метод, який саме ґрунтується на використанні закону розподілу Пуассона. Перед застосуванням цього методу було проведено статистичне дослідження кількості нещасних випадків за останні тринадцять років. Отримані дані прогнозу мали достатній рівень достовірності.

Поряд з цим, згідно [8] на точність прогнозу з використанням розподілу Пуассона впливає розмір вибірки та стандартне відхилення значень вибірки. За малої вибірки і великої дисперсії її значень отримані результати прогнозування будуть найменш достовірними.

В [9] досліджувалися статистичні закономірності виникнення пожеж в населених пунктах під час воєнного стану. Встановлено, що динаміку виникнення пожеж не можна було описати законом розподілу Пуассона. Тільки для 35 % з досліджуваних населених пунктів вдалося виявити, що часові інтервали між пожежами можуть бути описаними експоненційним законом розподілу.

В [10] досліджено процес виникнення пожеж в населених пунктах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб. До цих населених пунктів відносяться Київ, Дніпро, Одеса, Харків, Кривий Ріг, Запоріжжя та Львів. Перевірено статистичні гіпотези про можливість опису процесу виникнення пожеж нормальним, експоненційним, гамма, хі-квадрат, Пуассона та геометричним розподілами. Лише для окремих населених пунктів і в окремі роки, а це був часовий період з 2021 по 2023 рік вдалося встановити закон розподілу, яким був експоненційний. Відповідно було зроблено висновок, що в сучасних умовах необхідно проводити перевірку статистичних закономірностей окремо для кожного населеного пункту. При цьому для населених пунктів з чисельністю населення менше 500 тисяч осіб. перевірка названих статистичних закономірностей не проводилася.

Відповідно для виконання прогнозу пожеж в населених пунктах в більшості використовуються різні статистичні методи. Поряд з цим в залежності від чисельності населення і особливостей оперативної обстановки, яка там склалася процес виникнення пожеж не завжди може бути описаний статистичними закономірностями.

Отже, невирішеною частиною розглянутої проблеми є те, що залишається недослідженим процес виникнення пожеж в населених пунктах з чисельністю населення менше 500 тисяч осіб в період воєнного стану.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є встановлення законів розподілу, які дозволяють описати процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах України в період дії воєнного стану.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- встановити закон розподілу, який дозволяє описати процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах до введення воєнного стану;
- встановити закон розподілу, який дозволяє описати процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах в період дії воєнного стану.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах України. До цих груп населених пунктів відносяться ті, які мають чисельність населення від 50 до 500 тисяч осіб. Предметом дослідження є статистичні закони розподілу, які дозволяють описати процес виникнення пожеж.

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що процес виникнення пожеж в населених пунктах може бути описаний статистичними законами розподілу.

Досліджувалися пожежі, які виникали в 50 населених пунктах України за період з 2021 по 2023 рік. Опрацювання статистичних проводилося з допомогою табличного редактора Microsoft Excel. Встановлення статистичних законів розподілу проводилося з допомогою програмного продукту STATISTICA 6.0.

5. Встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж до введення воєнного стану

Досліджувався період за 2021 рік. У табл. 1 наведені дані щодо характеристик значень вибірки.

Табл. 1. Характеристика значень вибірки для періоду 2021 року

Місто	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення	Максимальна кількість пожеж за день
1	2	3	4
Вінниця	1,1	1,3	12
Луцьк	0,3	0,6	3
Ковель	0,1	0,3	2
Нововолинськ	0,1	0,3	2
Кам’янське	1,4	1,5	9
Павлоград	1	1,3	6
Краматорськ	0,7	1,1	8
Слов’янськ	0,8	1,3	12
Костянтинівка	0,4	0,7	4
Покровськ	0,2	0,4	2
Дружківка	0,3	0,7	3
Житомир	1,1	1,3	8
Бердичів	0,4	0,7	3
Коростень	0,4	0,7	5
Новоград-Волинський	0,2	0,6	5
Ужгород	0,7	1	7
Мукачево	0,4	0,7	4
Івано-Франківськ	0,9	1	5
Калуш	0,4	0,8	7
Коломия	0,2	0,5	2
Біла Церква	1,1	1,4	11
Бровари	0,5	0,8	7
Бориспіль	0,5	0,8	3
Кропивницький	0,7	0,9	5
Олександрія	0,4	0,7	4
Дрогобич	0,3	0,6	4
Червоноград	0,3	0,5	2
Стрий	0,2	0,5	3
Миколаїв	2,2	2	11
Первомайськ	0,3	0,6	3
Ізмаїл	0,5	0,9	6
Чорноморськ	0,2	0,5	5
Полтава	0,9	1,2	8
Кременчук	0,6	0,9	6
Горішні Плавні	0,1	0,3	2
Рівне	0,4	0,8	10

Продовження табл. 1

1	2	3	4
Суми	0,6	0,9	8
Конотоп	0,2	0,5	3
Шостка	0,2	0,4	3
Тернопіль	0,5	0,7	4
Лозова	0,2	0,5	3
Хмельницький	0,5	0,9	7
Кам’янець-Подільський	0,2	0,4	2
Черкаси	0,5	0,8	7
Умань	0,2	0,5	3
Сміла	0,1	0,4	4
Чернівці	0,9	1,2	8
Чернігів	0,9	1,1	8
Ніжин	0,2	0,5	3
Прилуки	0,2	0,4	2

У табл. 2 наведені дані щодо результатів перевірки висунутих статистичних гіпотез для населених пунктів до введення воєнного стану. Для цього було використано програмний продукт STATISTICA 6.0 та критерій узгодженості Пірсона.

Табл. 2. Результати перевірки статистичних гіпотез

Місто	Вид розподілу 2021
1	2
Вінниця	Пуассона
Луцьк	Пуассона; Геометричний
Ковель	-
Нововолинськ	-
Кам’янське	-
Павлоград	Геометричний
Краматорськ	Геометричний
Слов’янськ	-
Костянтинівка	Геометричний
Покровськ	Пуассона; Геометричний
Дружківка	Геометричний
Житомир	-
Бердичів	Пуассона; Геометричний
Коростень	Пуассона; Геометричний
Новоград-Волинський	Геометричний
Ужгород	Пуассона
Мукачево	Геометричний
Івано-Франківськ	Пуассона
Калуш	Геометричний
Коломия	Пуассона; Геометричний
Біла Церква	-
Бровари	Геометричний
Бориспіль	Геометричний
Кропивницький	Пуассона
Олександрія	Геометричний
Дрогобич	Пуассона; Геометричний
Червоноград	Пуассона; Геометричний
Стрий	Пуассона; Геометричний

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

Продовження табл. 2

1	2
Миколаїв	-
Первомайськ	Пуассона
Ізмаїл	-
Чорноморськ	Пуассона; Геометричний
Полтава	-
Кременчук	-
Горішні Плавні	-
Рівне	Геометричний
Суми	Пуассона
Конотоп	Пуассона; Геометричний
Шостка	Пуассона
Тернопіль	Пуассона
Лозова	Геометричний
Хмельницький	Геометричний
Кам’янець-Подільський	Пуассона; Геометричний
Черкаси	Пуассона; Геометричний
Умань	Пуассона; Геометричний
Сміла	Геометричний
Чернівці	-
Чернігів	Пуассона
Ніжин	Геометричний
Прилуки	Геометричний

Для більшості з досліджуваних населених пунктів вдалося встановити статичний закон розподілу.

6. Встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж після введення воєнного стану

Досліджувався період часу з 2022 по 2023 рік. У табл. 3 і табл. 4 наведені дані характеристик значень вибірки.

Табл. 3. Характеристика значень вибірки для періоду 2022 року

Місто	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення	Максимальна кількість пожеж за день
1	2	3	4
Вінниця	1	1,2	9
Луцьк	0,3	0,6	4
Ковель	0,3	0,8	6
Нововолинськ	0,1	0,4	2
Кам’янське	1,3	1,6	9
Павлоград	0,6	1	6
Краматорськ	0,5	1	11
Слов’янськ	0,6	1,4	17
Костянтинівка	0,5	0,9	9
Покровськ	0,3	0,6	6
Дружківка	0,2	0,5	2
Житомир	0,8	1	5
Бердичів	0,4	0,7	5
Коростень	0,4	0,7	4
Новоград-Волинський	0,2	0,5	3
Ужгород	0,8	1,2	7

Продовження табл. 3

1	2	3	4
Мукачево	0,5	0,9	5
Івано-Франківськ	0,7	0,9	5
Калуш	0,5	0,9	7
Коломия	0,3	0,6	4
Біла Церква	0,7	0,9	4
Бровари	0,2	0,5	5
Бориспіль	0,3	0,6	4
Кропивницький	0,7	0,9	5
Олександрія	0,3	0,5	3
Дрогобич	0,4	0,7	4
Червоноград	0,2	0,5	3
Стрий	0,3	0,5	3
Миколаїв	1,8	2	13
Первомайськ	0,3	0,5	2
Ізмаїл	0,7	1	8
Чорноморськ	0,2	0,4	2
Полтава	0,7	0,9	5
Кременчук	0,5	0,8	6
Горішні Плавні	0,1	0,3	2
Рівне	0,3	0,6	4
Суми	0,8	1	5
Конотоп	0,2	0,4	3
Шостка	0,3	0,6	3
Тернопіль	0,4	0,7	4
Лозова	0,2	0,5	5
Хмельницький	0,4	0,7	4
Кам’янець-Подільський	0,2	0,5	3
Черкаси	0,5	0,8	5
Умань	0,2	0,5	4
Сміла	0,1	0,3	2
Чернівці	1,4	1,8	14
Чернігів	2,6	5	31
Ніжин	0,2	0,6	5
Прилуки	0,2	0,5	6

Табл. 4. Характеристика значень вибірки для періоду 2023 року

Місто	Середнє ариф-метичне	Стандартне від-хилення	Максимальна кіль-кість пожеж за день
1	2	3	4
Вінниця	1	1,1	5
Луцьк	0,3	0,6	4
Ковель	0,1	0,4	2
Нововолинськ	0,1	0,3	2
Кам’янське	1,2	1,4	8
Павлоград	0,8	1,2	7
Краматорськ	0,5	0,9	6
Слов’янськ	0,4	0,7	4
Костянтинівка	0,6	0,9	5
Покровськ	0,2	0,5	3
Дружківка	0,4	0,6	4
Житомир	0,9	1,2	6

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

Продовження табл. 4

1	2	3	4
Бердичів	0,3	0,7	5
Коростень	0,4	0,8	5
Новоград-Волинський	0,2	0,5	3
Ужгород	0,5	0,7	4
Мукачево	0,2	0,5	3
Івано-Франківськ	0,6	0,8	3
Калуш	0,3	0,6	5
Коломия	0,1	0,3	1
Біла Церква	0,6	0,8	5
Бровари	0,3	0,6	6
Бориспіль	0,3	0,6	4
Кропивницький	1	1,2	6
Олександрія	0,3	0,7	4
Дрогобич	0,2	0,5	3
Червоноград	0,2	0,5	4
Стрий	0,2	0,5	3
Миколаїв	1,7	1,7	10
Первомайськ	0,4	0,7	8
Ізмаїл	0,6	0,9	6
Чорноморськ	0,2	0,5	4
Полтава	0,6	1	8
Кременчук	0,4	0,7	4
Горішні Плавні	0,1	0,2	1
Рівне	0,2	0,6	6
Суми	0,8	1,1	6
Конотоп	0,3	0,6	4
Шостка	0,4	0,7	4
Тернопіль	0,5	1,1	17
Лозова	0,2	0,4	2
Хмельницький	0,4	0,8	8
Кам’янець-Подільський	0,2	0,5	5
Черкаси	0,5	0,9	9
Умань	0,3	0,8	12
Сміла	0,2	0,4	2
Чернівці	0,8	1	6
Чернігів	0,9	1,2	10
Ніжин	0,2	0,5	5
Прилуки	0,2	0,5	4

У табл. 5 наведені дані щодо результатів встановлення статистичних законів розподілу. Для цього було використано програмний продукт STATISTICA 6.0 та критерій узгодженості Пірсона.

Для більшості населених пунктів в період воєнного стану вдалося встановити статистичний закон розподілу.

7. Обговорення результатів встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж

Загальновідомо, що процес виникнення пожеж у великих і середніх населених пунктах може бути описаний законом розподілу Пуассона але виконання вказаної закономірності не перевірялося в умовах воєнного стану. Підтвердження виконан-

ня цієї закономірності за результатами опрацювання статистичних даних в період воєнного стану є достатньо зрозумілим явищем. Поряд з цим не зрозуміло як вказаний процес може бути описаним іншими статистичними законами розподілу.

Табл. 5. Результати встановлення статистичних законів розподілу

Місто	Вид розподілу 2022	Вид розподілу 2023
1	2	3
Вінниця	-	Пуассона
Луцьк	Експоненційний Пуассона Геометричний	Пуассона Геометричний
Ковель	Експоненційний Геометричний	Геометричний
Нововолинськ	Геометричний	-
Кам’янське	-	-
Павлоград	Геометричний	Геометричний
Краматорськ	Геометричний	-
Слов’янськ	Геометричний	Пуассона Геометричний
Костянтинівка	Геометричний	Геометричний
Покровськ	Пуассона Геометричний	Пуассона Геометричний
Дружківка	Геометричний	Пуассона
Житомир	-	Геометричний
Бердичів	Геометричний	Геометричний
Коростень	Пуассона	Геометричний
Новоград-Волинський	Геометричний	Пуассона Геометричний
Ужгород	Геометричний	Геометричний
Мукачево	Геометричний	Пуассона
Івано-Франківськ	Пуассона	Пуассона
Калуш	Геометричний	Пуассона
Коломия	Експоненційний Геометричний	-
Біла Церква	-	Пуассона
Бровари	Пуассона	Пуассона
Бориспіль	Пуассона	Експоненційний Геометричний
Кропивницький	Пуассона	-
Олександрія	Пуассона Геометричний	Геометричний
Дрогобич	Геометричний	Геометричний
Червоноград	Геометричний	Пуассона Геометричний
Стрий	Пуассона Геометричний	Геометричний
Миколаїв	-	-
Первомайськ	Пуассона	Пуассона
Ізмаїл	Геометричний	Геометричний
Чорноморськ	Пуассона Геометричний	Пуассона
Полтава	Пуассона	Геометричний

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

Продовження табл. 5

1	2	3
Кременчук	Пуассона	Пуассона
Горішні Плавні	-	-
Рівне	Геометричний	Геометричний
Суми	-	Геометричний
Конотоп	Геометричний	Геометричний
Шостка	Пуассона Геометричний	Геометричний
Тернопіль	Пуассона Геометричний	-
Лозова	Пуассона Геометричний	Пуассона
Хмельницький	Пуассона Геометричний	Геометричний
Кам'янець-Подільський	Пуассона Геометричний	Пуассона Геометричний
Черкаси	Геометричний	Геометричний
Умань	Геометричний	Геометричний
Сміла	-	-
Чернівці	-	Геометричний
Чернігів	-	-
Ніжин	Геометричний	Пуассона Геометричний
Прилуки	Геометричний	Геометричний

Особливість отриманих результатів у порівнянні із вже відомими полягає у тому, що досліджувалися статистичні закономірності виникнення пожеж саме в період воєнного стану. Як було вказано раніше цей процес мав плив на особливості оперативної обстановки в населених пунктах України.

Дослідження обмежуються можливістю отримання необхідних статистичних даних в період воєнного стану.

Недоліком дослідження є невеликий часовий інтервал за який були опрацьовані статистичні дані – всього три роки. Можливо більш точні дані могли бути отримані при опрацюванні даних за більший часовий інтервал.

В подальшому планується дослідити рівень достовірності прогнозів кількості пожеж під час воєнного стану при використанні різних методів прогнозування. Під час виконання цих досліджень можна зіткнутися з проблемою збору необхідних статистичних даних особливо по населених пунктах, які знаходяться поблизу району ведення бойових дій.

8. Висновки

1. Встановлено, що у великих і середніх населених пунктах до введення воєнного стану, а саме за період 2021 року процес виникнення пожеж міг бути описаний пуассонівським та геометричним статистичними законами розподілу, що у відсотковому співвідношенні становить 44 % та 58 % випадків відповідно. Траплялися також випадки, коли по окремим населеним пунктам вказаний процес міг бути описаний відразу двома законами розподілу, що у відсотковому відношенні складає 26 % випадків і є не досить зрозумілим. Для 24 % з числа досліджуваних населених пунктів не вдалося встановити жодного закону розподілу.

2. Встановлено, що у великих і середніх населених пунктах після введення

воєнного стану, а саме за період 2022 та 2023 року процес виникнення пожеж міг бути описаний пуассонівським, геометричним та експоненційним статистичними законами розподілу, що у відсотковому співвідношенні для періоду 2022 року становить 36 %, 64 % та 6 % випадків, а для періоду 2023 року – 36 %, 58 % та 2 % випадків відповідно. Випадків, коли названий процес можна було відразу описати декількома законами розподілу для періоду 2022 року становить 24 %, а для періоду 2023 року – 16 %. Жодного закону розподілу за період 2022 року не вдалося встановити для 20 % відсотків серед досліджуваних населених пунктів, а за період 2023 року цей показник становив також 20 %.

За ввесь досліджуваний період часу збіг по рокам по встановленим законам розподілу спостерігався: для закону розподілу Пуассона у 12 % випадків, для геометричного закону розподілу у 36 % випадків, а випадків, коли одночасно спостерігалося два цих закони розподілу було 6 % від їх загальної кількості.

Література

1. Ganteaume A., Barbero R., Jappiot M., Maillé E. Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. Journal of Safety Science and Resilience. 2021. № 1. P. 20–29. doi: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001

2. Artés T., Oom D., Rigo D., Durrant T., Maianti P., Libertà G., San-Miguel-Ayanz J. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. 2019. № 296. URL: https://www.nature.com/articles/s41597-019-0312-2

3. Rui R., Hui Z., Zhao H., Siyue H., Xiuling W. Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016. Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. № 83. P. 452–460. doi: 10.1016/j.tust.2018.10.008

4. Yongchang Z., Panpan G., Sivaparthipan C. B., Bala A. M. Big data and artificial intelligence based early risk warning system of fire hazard for smart cities. Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2021. № 45. 100986. doi: 10.1016/j.seta.2020.100986

5. Guangyin J., Qi W., Cunchao Z., Yanghe F., Jincai H., Xingchen H. Urban Fire Situation Forecasting: Deep sequence learning with spatio-temporal dynamics. Applied Soft Computing. 2020. № 97. 106730. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106730

6. Usanov D., G. A. Guido Legemaate, Peter M. van de Ven, Rob D. van der Mei. Fire truck relocation during major incidents. Naval Research Logistics. 2019. Vol. 66. № 2. P. 105–122. doi: 10.1002/nav.21831

7. Bilir S., Gurcanli G. E. A Method to Calculate the Accident Probabilities in Construction Industry Using a Poisson Distribution Model. Advances in Safety Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Safety Management and Human Factors, July 27–31, 2016. Florida: Walt Disney World. 2016. P. 513–523. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41929-9_47

8. Ribeiro E. E., Zeviani W. M., Hinde J. Reparametrization of COM–Poisson regression models with applications in the analysis of experimental data. Statistical Modelling. 2019. Vol. 20. № 5. doi: 10.1177/1471082X19838651

9. Коваленко Р. І., Назаренко С. Ю., Михлюк Е. І., Семків В. О. Статистичні закономірності виникнення пожеж в містах під час воєнного стану. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків. 2023. № 2(38). С. 194–207.

10. Коваленко Р. І., Назаренко С. Ю., Михлюк Е. І., Остапов К. М. Закономірності виникнення пожеж в містах під час воєнного стану. Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків. 2024. № 1(39). С. 167–178.

 © Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

R. Kovalenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
A. Kalynovskyi, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
S. Nazarenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
M. Zhuravskij, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

REGULARITIES OF BLAME IN GREAT AND MIDDLE POPULATIONS OF UKRAINE

The process of fire occurrence in settlements of Ukraine with a population of 50 to 500 thousand people for the period from 2021 to 2023 was studied. The statistical hypothesis that the process of fire occurrence in settlements can be described by statistical laws was tested. It was established that the process of fire occurrence in large and medium-sized settlements of Ukraine in most cases can be described by statistical laws. It was found that for the period of 2021, the process of fire occurrence could be described by Poisson and geometric distribution laws, which in percentage terms is 44 % and 58 % of cases, respectively. There were also cases when, for individual settlements, the specified process could be described by two distribution laws at once, which in percentage terms is 26 % of cases and is not sufficiently clear. It was not possible to establish a single distribution law for 24 % of the studied settlements. For the period of 2022 and 2023, the process of fire occurrence could be described by Poisson, a geometric and exponential distribution law, which in percentage terms for the period of 2022 is 36 %, 64 % and 6 % of cases, and for the period of 2023 – 36 %, 58 % and 2 % of cases, respectively. The number of cases when the mentioned process could be described at once by several distribution laws for the period of 2022 is 24 %, and for the period of 2023 – 16 %. It was not possible to establish any distribution law for the period of 2022 for 20 % of the studied settlements, and for the period of 2023 this indicator was also 20 %. In the future, it is planned to investigate the level of reliability of forecasts of the number of fires when using known forecasting methods during martial law.

Keywords: fire, martial law, statistical hypothesis, law of distribution, emergency and rescue formation, Pearson's test

References

1. Ganteaume, A., Barbero, R., Jappiot, M., Maillé, E. (2021). Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface. Journal of Safety Science and Resilience, 1, 20–29. doi: 10.1016/j.jnlssr.2021.01.001

2. Artés, T., Oom, D., Rigo, D., Durrant, T., Maianti, P., Libertà, G., San-Miguel-Ayanz, J. (2019). A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour, 296. Available at: https://www.nature.com/articles/s41597-019-0312-2

3. Rui, R., Hui, Z., Zhao, H., Siyue, H., Xiuling, W. (2019). Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016. Tunnelling and Underground Space Technology, 83, 452–460. doi: 10.1016/j.tust.2018.10.008

4. Yongchang, Z., Panpan, G., Sivaparthipan, C. B., Bala, A. M. (2021). Big data and artificial intelligence based early risk warning system of fire hazard for smart cities. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 45, 100986. doi: 10.1016/j.seta.2020.100986

5. Guangyin, J., Qi W., Cunchao, Z., Yanghe, F., Jincai, H., Xingchen, H. (2020). Urban Fire Situation Forecasting: Deep sequence learning with spatio-temporal dynamics. Applied Soft Computing, 97, 106730. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106730

6. Usanov, D., G. A. Guido Legemaate, Peter, M. van de Ven, Rob, D. van der Mei. (2019). Fire truck relocation during major incidents. Naval Research Logistics, 66, 2, 105–122. doi: 10.1002/nav.21831

7. Bilir, S., Gurcanli, G. E. (2016). A Method to Calculate the Accident Probabilities in Construction Industry Using a Poisson Distribution Model. Advances in Safety

Management and Human Factors: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Safety Management and Human Factors, July 27–31, 2016, 513–523. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-41929-9_47

8. Ribeiro, E. E., Zeviani, W. M., Hinde, J. (2019). Reparametrization of COM–Poisson regression models with applications in the analysis of experimental data. Statistical Modelling, 20, 5. doi: 10.1177/1471082X19838651

9. Kovalenko, R. I., Nazarenko, S. Y., Mykhlyuk, E. I., Semkiv, V. O. (2023). Statystychni zakonomirnosti vynyknennya pozhezh v mistakh pid chas voyennoho stanu. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 2(38), 194–207.

10. Kovalenko, R. I., Nazarenko, S. YU., Mykhlyuk, E. I., Ostapov, K. M. (2024). Zakonomirnosti vynyknennya pozhezh v mistakh pid chas voyennoho stanu. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 1(39), 167–178.

Надійшла до редколегії: 12.10.2024
Прийнята до друку: 13.11.2024

© Р. І. Коваленко, А. Я. Калиновський, С. Ю. Назаренко, М. М. Журавський

УДК 614.841.343

С. О. Сідней, *к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-7664-6620)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

УТОЧНЕНИЙ МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ ВОГНЕСТІЙКОСТІ РЕБРИСТИХ ПЛИТ ЗА ВТРАТОЮ ЦІЛІСНОСТІ

Проведені дослідження з оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит при настанні граничного стану втрати цілісності. У EN 1992-1-2 відсутні розрахункові методики визначення межі або класу вогнестійкості залізобетонних плит при настанні граничного стану втрати цілісності (E). Наукові праці, присвячені цьому напрямку досліджень зосереджені лише на двох граничних станах вогнестійкості: несучій спроможності (R) та теплоізолювальній здатності (I). Експериментальні випробування піддаються критиці через труднощі у фіксуванні ознак настання граничного стану втрати цілісності, зокрема через необхідність контролю необігрівної поверхні ребристої плити під час пожежі при дії механічного навантаженням. Отже методики проведення розрахунку щодо оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності немає. При цьому для забезпечення безпечної евакуації людей при виникненні пожежі, запобігання її поширенню або небезпечних чинників, а також проведення ефективної роботи рятувальників необхідно застосування будівельних конструкцій з гарантованими класами вогнестійкості. Представлені результати вирішення теплотехнічної та статичної задач, які стосуються розподілу температури та напружено-деформованого стану досліджуваної ребристої плити. Проведені дослідження щодо вогнестійкості залізобетонних ребристих плит з урахуванням настання граничного стану втрати цілісності надали можливість встановити залежність межі вогнестійкості цих конструкцій за втратою цілісності від рівня прикладеного механічного навантаження. Отриманий графік залежності дозволяє проводити оцінювання залізобетонних ребристих плит за критерієм настання граничного стану втрати цілісності, що надає можливість визначати більш об’єктивно вогнестійкість таких будівельних конструкцій.

Ключові слова: вогнестійкість залізобетонних ребристих плит, моделювання пожежі, наскрізні тріщини, втрата цілісності

1. Вступ

Сучасне будівництво спрямоване на мінімізацію витрат, але при цьому необхідно забезпечувати міцність будівельних конструкцій, що є передумовою безпеки та комфорту для людей під час експлуатації будівель та споруд [1]. Заощадження коштів передбачається за рахунок зменшення витрат на матеріали при виготовленні конструкцій, що зменшує їхню вагу. В результаті досягається економічна доцільність при влаштуванні фундаменту. Одним із видів таких будівельних конструкцій є залізобетонні ребристі плити, які мають меншу вагу порівняно з суцільними плитами тієї ж товщини, що зменшує навантаження на фундамент (Structville). Це дозволяє заощадити на матеріалах як для плит, так і для фундаментів. Завдяки зменшенню об’єму бетону та сталі, необхідних для виготовлення ребристих плит, знижується загальна вартість матеріалів. Конструкція ребристих плит забезпечує високу міцність і жорсткість при меншій вазі, що дозволяє зберігати необхідні технічні характеристики будівель. Ребристі плити легші та зручніші для транспортування і монтажу, що скорочує витрати на будівельні роботи. Зменшення ваги конструкцій веде до зниження витрат на фундамент, що є важливою складовою при будівництві. Таким чином, використання ребристих плит дозволяє досягти значної економії коштів без шкоди для безпеки та комфорту експлуатації будівель і споруд. Застосування таких конструкцій в порівнянні з плоскими плитами або монолітним перекриттям знижує власну вагу перекриття до 40 %, зменшує витрату бетону до 60 % за рахунок видалення з нижньої розтяг-

нутої зони. При цьому жорсткість ребристих плит не поступається монолітним та плоским перекриттям. Це дозволяє влаштовувати великі прольоти без використання додаткових опор до 18 метрів, що дає можливість забезпечити більший простір, для влаштування промислових об'єктів. Таким чином, ребристі плити є доцільним та ефективним рішенням у сучасному будівництві завдяки їх економічності, зменшенню ваги конструкцій, покращеній стійкості та можливості перекриття великих прольотів. Це дозволяє створювати більш функціональні та естетично привабливі будівлі з підвищеним комфортом для користувачів.

Тому дослідження, присвячені вивченню поведінки залізобетонних ребристих плит під час впливу стандартного температурного режиму пожежі, а також механічного навантаження, є актуальним. Враховуючи, що ребристі плити забезпечують економічність, знижують вагу конструкцій і дозволяють перекривати великі прольоти без додаткових опор, розуміння їхньої вогнестійкості є ключовим для забезпечення безпеки і надійності сучасних будівель. Це забезпечить створення стійких і довговічних конструкцій, що відповідають вимогам будівництва та експлуатації, з мінімальними витратами.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

З метою недопущення поширення пожежі в об'ємі будівлі, на стадії проєктування необхідно використовувати будівельні конструкції з відповідним класом або межею вогнестійкості. Це допоможе унеможливити розповсюдження небезпечних чинників пожежі протягом необхідного часу. Відповідно до табл. 1 [2], для міжповерхових плит перекриття встановлено вимоги щодо граничних станів несучої спроможності (R), цілісності (E) та теплоізолювальної здатності (I), а для плит покриття — лише R та E. Дотримання вимог щодо втрати цілісності обумовлюється обмеженням поширення високих температур, токсичних продуктів згоряння, температури, полум'я, диму, що є критично важливим для безпечної евакуації людей і матеріальних цінностей та роботи аварійно-рятувальних підрозділів. У [3] описаний загальний уточнений розрахунковий підхід для оцінювання вогнестійкості залізобетонних плит перекриття. Однак цей підхід передбачений лише для перевірки відповідності до необхідного класу вогнестійкості лише за втратою несучої спроможності та теплоізолювальної здатності, що не дозволяє об'єктивно визначити клас вогнестійкості конструкції. Отже оцінювання проводиться без врахування часу настання граничного стану втрати цілісності, що унеможливлює точне передбачення, коли з'являться критичні тріщини, через які можуть проникати небезпечні чинники пожежі, до або після втрати несучої здатності. Така невизначеність може становити загрозу для життя та здоров'я людей, а також створювати перешкоди для аварійно-рятувальних підрозділів до моменту втрати несучої та теплоізоляційної здатності. Відповідно до [3], передбачається проведення розрахунків вогнестійкості плит за спрощеним (зонним) методом, але лише для плит з товщиною 200 мм. Це обумовлено тим, що у [3] наведено температурні криві для визначення температури в перерізі лише для плит із висотою перерізу 200 мм. Тобто використовувати наведені температурні криві у [3] для оцінювання ребристих плит за цим методом взагалі не передбачається можливим [4]. Слід зауважити, що табличний метод перевірки для плит перекриття та покриття [5] висуває надто суворі вимоги до цих конструкцій. Цей метод не враховує матеріалів, з яких виготовлені конструкції, геометричних характеристик перерізу, зокрема моменту опору, а також не враховує рівень навантаження.

© С. О. Сідней

Крім того, цей метод має обмеження щодо перерізу, що робить його неефективним для оцінювання вогнестійкості ребристих плит. Ці обмеження полягають у тому, що для застосування табличного методу мінімальна ширина ребра та товщина самої плити повинні бути не менше 80 мм. Це означає, що конструкції з меншими розмірами неможливо оцінити за вогнестійкістю за цим методом. При цьому визначенню вогнестійкості залізобетонних плит перекриттів присвячено багато наукових робіт, але в них також описані дослідження лише настання двох граничних станів з вогнестійкості несуча спроможність R та теплоізолювальна здатність I.

Так, наприклад, у [6] розглядається розподіл температури в залізобетонній багатопустотній плиті перекриття з урахуванням теплообміну в пустотах плити в умовах пожежі. Однак автор не враховує зниження механічних властивостей бетону та арматури під впливом високих температур, що унеможливлює точне визначення напружено-деформованого стану конструкції. Це, у свою чергу, є перешкодою для ідентифікації настання граничних станів вогнестійкості, зокрема втрати несучої здатності та цілісності. В роботі [7] автор акцентує увагу на зниженні механічних характеристик арматури та бетону в умовах пожежі. Але при цьому роботі недостатньо уваги приділено аналізу динаміки поширення тріщин та впливу цих процесів на загальну вогнестійкість. У роботі [4] проведено дослідження впливу механічного навантаження на межу вогнестійкості ребристої плити, проте в цій роботі враховувалося лише настання втрати несучої здатності. За результатами проведених розрахунків у [4] встановлено, що межа вогнестійкості при навантаженні конструкції на 50 % від несучої здатності становить 43,9 хв, що не дає можливості забезпечити клас вогнестійкості навіть REI 45. Але при тому настання граничного стану втрати цілісності для цієї конструкції у роботі [4] не проводилось, що не дає можливості підтвердити відповідність межі вогнестійкості 43 хв, опираючись лише на несучу здатність плити.

Згідно до EN 1363-1:2020 та EN 1365-2:2014, ще можна проводити оцінювання вогнестійкості будівельних конструкцій за допомогою експериментальних досліджень [8]. До експериментальних досліджень належать натурні вогневі випробування, що полягають у відтворенні будівлі в повному масштабі та створенні теплового впливу від пожежі на ці конструкції. Цей метод є значно затратним з усіх існуючих і складним у реалізації, оскільки відтворення теплового впливу за кривою стандартного температурного режиму в певному приміщенні будівлі є непростим завданням [8]. Це потребує додаткових досліджень для визначення кількості пальників, отворів для відведення диму, їхньої конфігурації та місця розташування [9]. Експериментальні випробування передбачають проведення досліджень з оцінювання вогнестійкості окремої будівельної конструкції або її фрагменту [9]. Такий метод є менш трудомістким та затратним, проте виготовлення будівельних конструкцій і їхнє транспортування до місця проведення досліджень також є непростим завданням. Це зумовлено тим, що кількість спеціалізованих лабораторій, які мають право на проведення таких робіт, є обмеженою. Проте, такий підхід піддається обґрунтованій критиці з точки зору можливості зафіксувати ознаки настання граничного стану втрати цілісності. Зокрема: спричинення займання ватного тампона, піднесеного до необігрівної поверхні конструкції; забезпечення можливості проникнення щупа відповідних розмірів в утворені тріщини; або виникнення стійкого полуменевого горіння також з боку необігрівної поверхні конструкції.

Отже, необхідне проведення постійного контролю необігрівної поверхні залізобетонної ребристої плити протягом випробувань [10]. Практичний досвід цих випробувань показує, що такий контроль є неможливим, оскільки необігрівна поверхня залізобетонних плит перекриттів покрита вантажами для відтворення умов механічного навантаження при роботі реальної конструкції [11].

Такий стан справ не дозволяє визначати межу вогнестійкості залізобетонних плит за граничним станом втрати цілісності, що ставить під сумнів об'єктивність отриманих результатів. Отже, розробка методу оцінювання вогнестійкості за настанням граничного стану втрати цілісності у ребристих плитах дозволить більш об'єктивно оцінювати такі будівельні конструкції.

3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи полягає у створенні методу оцінювання з вогнестійкості ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це дозволить підвищити надійність таких конструкцій під час пожежі, завдяки врахуванню отриманих показників вогнестійкості, що стосуються утворення тріщин, крізь які можливе проникнення небезпечних чинників пожежі.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– провести теплотехнічний та статичний розрахунки із використанням комп'ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі та механічного навантаження на залізобетонну ребристу плиту в програмному комплексі ANSYS протягом 60 хв;

– за результатами проведених розрахунків проаналізувати напружено-деформований стан залізобетонної ребристої плити та обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за втратою цілісності.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є вивчення напруженно-деформованого стану залізобетонних ребристих плит в умовах сумісного термосилового впливу.

Предмет дослідження – вогнестійкість залізобетонних ребристих плит при настанні граничного стану втрати цілісності.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що моделювання теплових і механічних впливів дозволить виявити закономірності, які визначають утворення наскрізних тріщин у залізобетонних плитах, що є ключовим параметром для оцінки їхньої вогнестійкості за втратою цілісності.

Методи дослідження включали два основні етапи:

1. Розробка математичної моделі у програмному комплексі ANSYS для дослідження напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах сумісного термосилового впливу протягом 60 хвилин.

2. Аналіз отриманих результатів моделювання для визначення критеріїв напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити в умовах пожежі з метою обґрунтування методу оцінювання вогнестійкості за критерієм втрати цілісності.

Для вивчення умов настання граничного стану втрати цілісності залізобетонними ребристими плитами було піддана дослідженню окрема залізобетонна ребриста плита [10], зовнішній вигляд якої подана на рис. 1. Дана плита являє собою типовий залізобетонний виріб згідно із проєктною документацією, що містить серія 1.465.1. Дана серія містить основні проєктні дані для ребристих залізо-

© С. О. Сідней

бетонних плит покриттів одноповерхових виробничих та складських будівель. Основними особливостями даної плити є наявність ребер із арматурними стержнями для підсилення панелі між її ребрами.

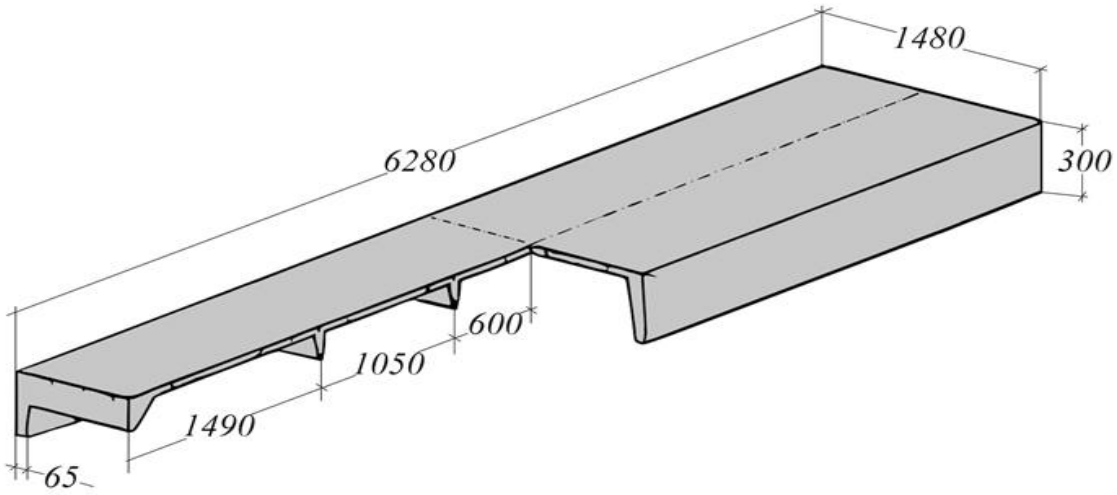


Рис. 1. Зовнішній вигляд досліджуваної залізобетонної ребристої плити [11]

Для розв'язання теплотехнічної задачі моделі ребристої плити, а потім для вирішення сумісного теплого та механічного впливу були прийняті такі основні положення при створенні скінченно-елементної моделі:

1. Для моделювання бетону було прийнято 8-вузловий гексаедричний скінченний елемент, для моделювання сталевої арматури 2-вузловий стрижневий скінченний елемент.

2. Всі типи скінченних елементів є фізично нелінійними, їх властивості відповідають моделям нелінійної поведінки матеріалів.

Розміри та кількість скінченних елементів у схемі залізобетонної ребристої плити подані у табл. 1.

Табл. 1. Параметри скінченних елементів моделей зразків для випробування

Частина моделі	Мін. розмір, мм	Макс. розмір, мм	Кількість
Бетонна основа	25	100	4128
Арматура	100	100	1328
Загальна кількість скінченних елементів:			5456

Параметри, які визначають густоту сітки, обрані для забезпечення доброї збіжності обчислювального процесу.

На рис. 2 показаний загальний вигляд скінчено-елементної схеми залізобетонної ребристої плити, що є відповідно дискретизованою розрахунковою областю.

На першому етапі при моделюванні теплового впливу у вигляді температурного навантаження на залізобетонну ребристу плиту розв'язувалася теплотехнічна задача. Для цього застосовується квазілінійне нестаціонарне диференціальне рівняння теплопровідності. Воно формулюється з постановкою крайової задачі, використовуючи граничні умови III роду. Враховується променистий та конвекційний теплообмін між обігрівними поверхнями та середовищем у приміщенні з пожежею.

Температурний режим впливу на залізобетонну ребристу плиту обчислюється за стандартним температурним режимом пожежі EN 1363-1:2020.

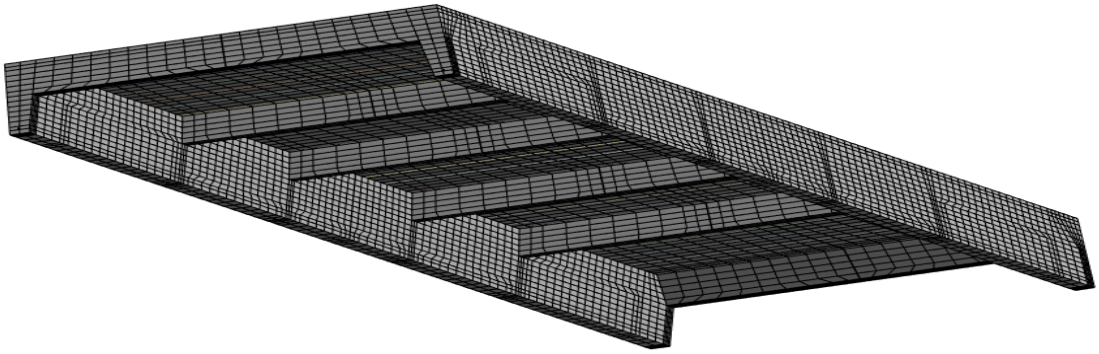


Рис. 2. Скінчено-елементна схема залізобетонної ребристої плити

Теплофізичні характеристики бетону та арматури відповідають температурним залежностям, які рекомендовано EN 1992-1-2.

Параметри граничних умов теплового впливу на залізобетонну ребристу плиту наведені у табл. 2.

Табл. 2. Параметри граничних умов для залізобетонної плити

Параметр	Позн.	Од.вим.	Вел.	Посилання
Обігрівна сторона				
Конвективна складова коефіцієнту теплообміну	α_c	Вт/(м^2°С)	25	EN 1991-1-2 Eurocode 1
Ступінь чорноти	ε	–	0,7	EN 1992-1-2 Eurocode 2
Необігрівна сторона				
Коефіцієнт теплообміну	α	Вт/(м^2°С)	9	EN 1991-1-2 Eurocode 2

Технічні дані бетону наведені в табл. 3 та зазначені основні характеристики для бетону залізобетонної ребристої плити, що було використано під час проведення моделювання.

Табл. 3. Технічні дані щодо залізобетонної ребристої плити

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Клас міцності бетону	МПа	С 20/25
Густина	кг/м^3	2400
Границя міцності	МПа	20
Розмір крупного заповнювача	м	0,02
Коефіцієнт Пуасона	–	0,3

Технічні дані щодо арматурної сталі наведені в табл. 4. У даній таблиці зазначені основні характеристики для сталі арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити.

Для отримання достовірних результатів поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах теплового впливу та механічного навантаження, застосовано відповідні деформативні характеристики бетону та арматури. Моделювання здійснювалося у програмному комплексі ANSYS з використанням діаграми «деформації-напруження». Ці характеристики рекомендовані EN 1992-1-1 та EN 1992-1-2

До верхньої поверхні залізобетонної ребристої плити прикладено механічне навантаження, яке відповідає різним рівням її несучої здатності, зокрема: 30 % – 1,8 кН/м², 50 % – 3 кН/м², 70 % – 4,2 кН/м², 90 % – 5,4 кН/м².

© С. О. Сідней

Табл. 4. Технічні дані щодо арматурної сталі ребристої плити

Параметр	Одиниці вимірювання	Величина
Густина	кг/м^3	7850
Модуль пружності	МПа	$2 \cdot 10^5$
Коефіцієнт пуасона	–	0,2
Арматура у поздовжніх ребрах		
Клас міцності	МПа	А400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	16
Арматура у поперечних ребрах		
Клас міцності	МПа	А400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	12
Армування панелі		
Клас міцності	МПа	А400
Границя міцності	МПа	400
Діаметр	мм	8

Згідно із рекомендаціями (IntechOpen-Open Science Open Minds) статичні задачі моделювання напружено-деформованого стану залізобетонних плит при односторонньому впливі на них пожежі зі стандартним температурним режимом вирішувалися з поетапним відтворенням історії навантаження у дві стадії. На першій стадії моделювалося теплове навантаження у вигляді впливу стандартного температурного режиму пожежі. Але, вплив пожежі на залізобетонну ребристу плиту відбувався після прийняття конструкцією механічного навантаження у вигляді рівномірно розподіленого навантаження. На другій стадії вже розв'язувалась статична задача, що передбачає сумісний термосиловий вплив на залізобетонну ребристу плиту.

Використані математичні моделі для проведення розрахунку поведінки залізобетонної ребристої плити в умовах сумісного термосилового впливу засновані на застосуванні неявного метода інтегрування диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану із використанням методу скінченних елементів.

5. Моделювання напружено-деформованого стану ребристої плити при пожежі та механічному навантаженні

5.1. Результати моделювання впливу температури пожежі та механічного навантаження на плиту

При моделюванні процесу теплопередачі в залізобетонній ребристій плиті при тепловому впливі стандартного температурного режиму пожежі отримані температурні дані у внутрішніх шарах. На рис. 3 наведені температурні розподіли у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу.

На рис. 3 видно, що внутрішні шари плити достатньо сильно прогріваються, особливо у панелі між ребрами.

Для аналізу нагрівання арматурних стержнів було побудовано температурні криві їхнього нагріву залежно від часу. На рис. 4 наведено побудовані криві нагріву арматури у залізобетонній ребристій плиті.

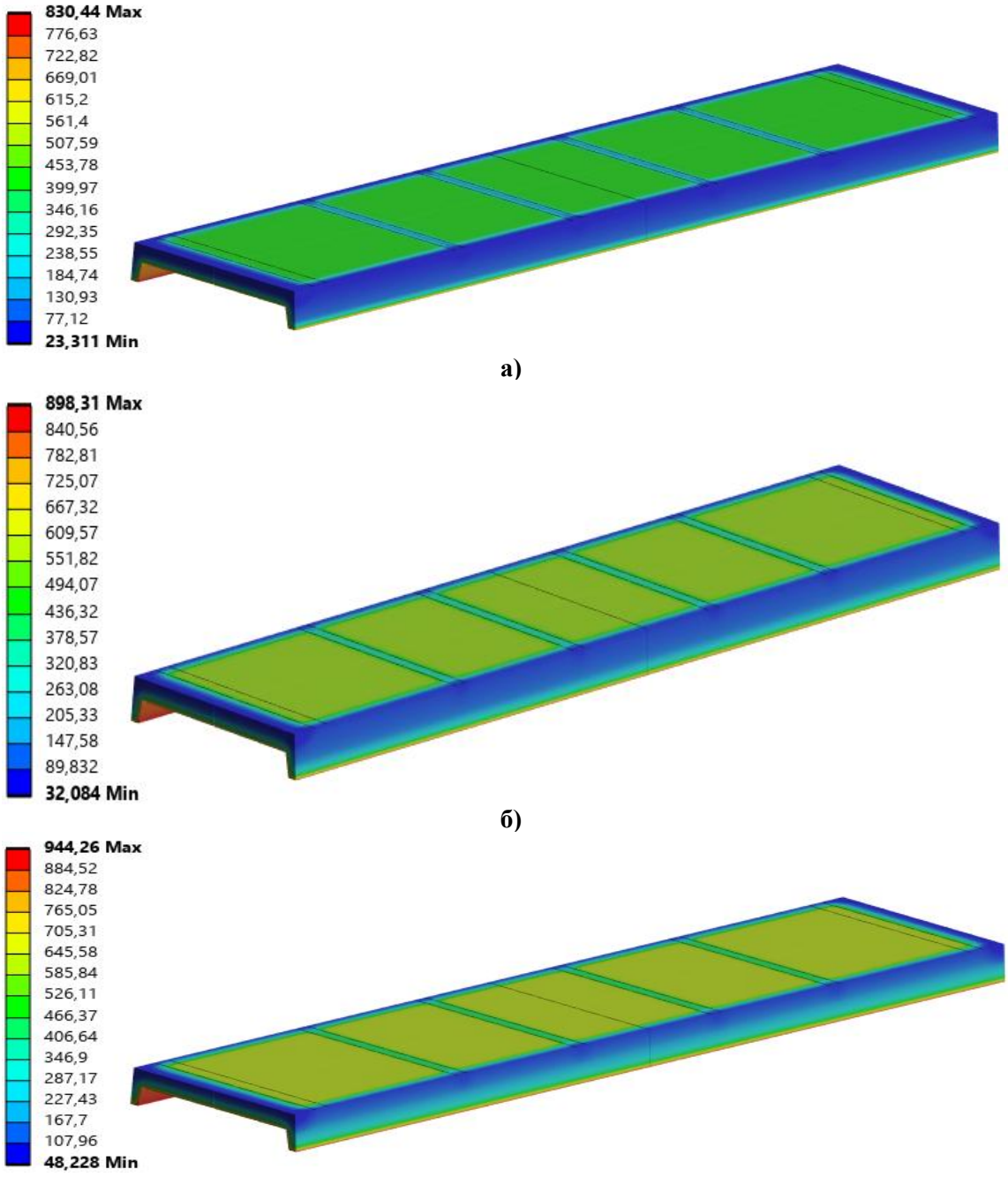


Рис. 3. Температурні розподілення у залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі (2): а – 30 хв; б – 45 хв; в – 60 хв

Для того щоб проаналізувати настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності був побудований графік середньої температури на необігрівній поверхні досліджуваної залізобетонної плити. На рис. 5 показаний побудований температурний графік прогріву не обігрівної поверхні плити, на якому також показана гранична температура щодо настання стану втрати теплоізолювальної здатності.

Відповідно до EN 1363-1:2020 критерій настання граничного стану втрати теплоізолювальної здатності є перевищення середньої температури на необігрівної поверхні плити на 140 °С або перевищення у будь-якій точці на 180 °С. Таким чином, графік на рис. 5 показує що межа вогнестійкості за настанням втрати теплоізолювальної здатності для даної плити становить 13 хв. Для плит покриттів це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується.

© С. О. Сідней

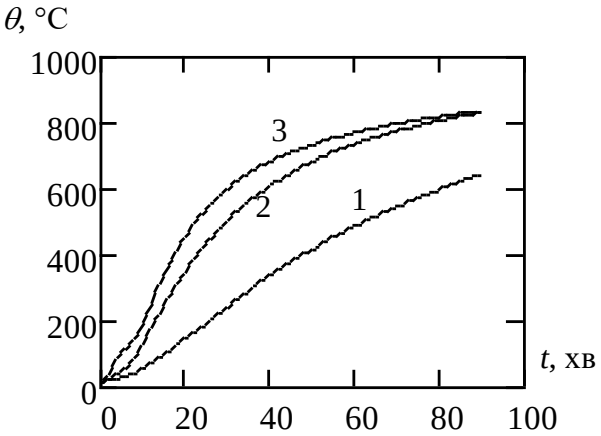


Рис. 4. Температурні криві нагріву арматурних стержнів залізобетонної ребристої плити залежно від часу: 1 – у поздовжньому ребрі; 2 – у поперечному ребрі; 3 – у панелі між ребрами

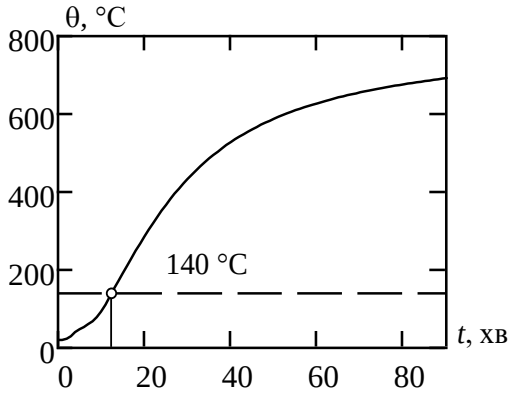


Рис. 5. Графік нагріву не обігрівної сторони досліджуваної залізобетонної ребристої плити

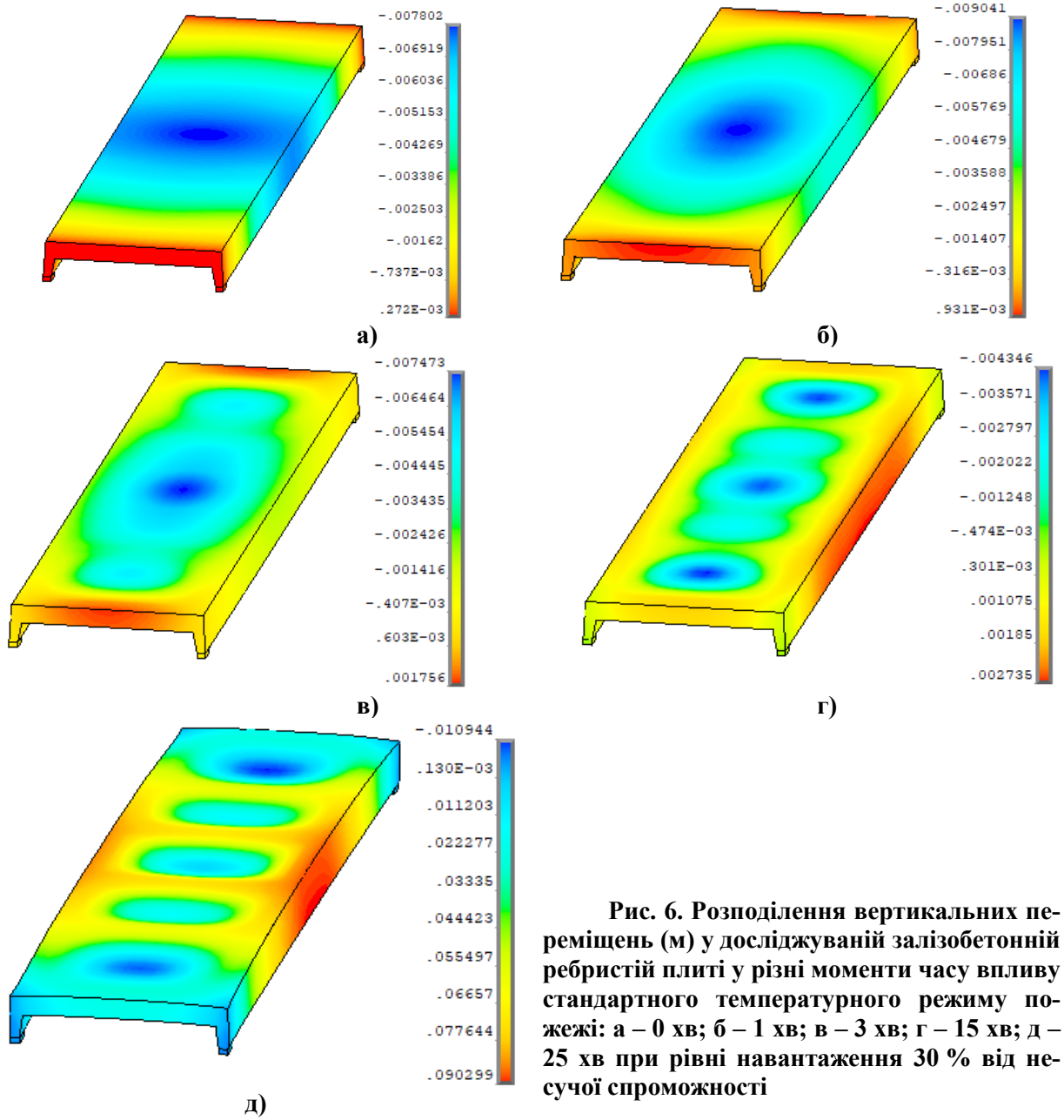
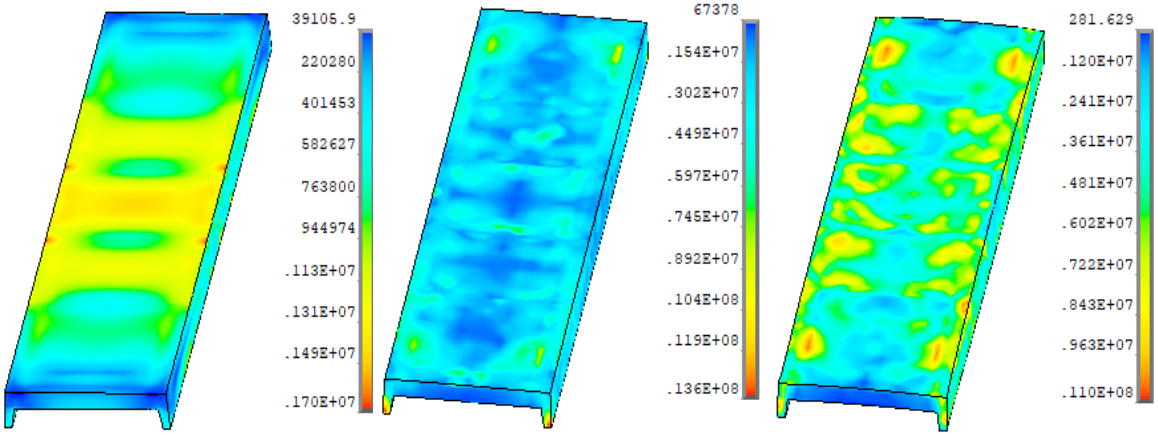


Рис. 6. Розподілення вертикальних переміщень (м) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 0 хв; б – 1 хв; в – 3 хв; г – 15 хв; д – 25 хв при рівні навантаження 30 % від несучої спроможності

Отримані результати розв'язання теплотехнічної задачі, які описані вище, було використано для проведення розрахунку параметрів напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити за прийнятим підходом. Після проведення обчислень був одержаний набір даних про напружено-деформований стан, що має бути проаналізований для виявлення аспектів та закономірностей настання граничного стану втрати цілісності залізобетонної ребристої плити під тепловим впливом пожежі. Так, на рис. 6 наведені розподілення вертикальних переміщень (м) у досліджуваній залізобетонній ребристій плиті у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі при рівні навантаження 30 % від несучої спроможності.

Також одним з обчислених параметрів, що є важливим для оцінювання можливості утворення наскрізних дефектів у залізобетонних ребристих плитах є напруження при яких виникають пластичні деформації у бетоні.

Цей параметр допомагає визначити настання граничного стану втрати цілісності.



а) **б)** **в)**

Рис. 7. Розподіли величини напружень (Па) при виникненні еквівалентної пластичної деформації по простору бетонної основи залізобетонної ребристої плити у різні моменти часу впливу стандартного температурного режиму пожежі: а – 0 хв; б – 10 хв; в – 25 хв при рівні навантаження 50 % від несучої спроможності

5.2. Аналіз напружено-деформованого стану та оцінка вогнестійкості за втратою цілісності

Отже, для розуміння механізму руйнування внутрішніх шарів плити було побудовано криві вертикальних переміщень залізобетонної ребристої плити для різних умов навантаження. На рис. 8 показані побудовані криві.

За результатами розв'язання статичної задачі встановлено, що нелінійні деформації у комірці між ребрами ребристої плити виникають на 17-й, 18-й, 22-й та 25-й хвилинах відповідно, залежно від рівня механічного навантаження. Таким чином, на основі цих даних передбачається настання граничного стану за вогнестійкістю, що характеризується втратою цілісності у комірці між ребрами плити.

На рис. 9 подані дані криві де показано умови настання граничного стану втрати цілісності і метод ідентифікації межі вогнестійкості за даними кривими.

На графіку рис. 9 видно, що для кривої 4, початок нелінійної деформації відбувається приблизно між 17 і 18 хвилинами, де прогин починає різко зростати. Опускання нормалі з цієї точки на вісь часу показує, що межа вогнестійкості для цього випадку буде на цьому проміжку часу. Такий саме принцип застосовується й для визначення для інших рівнях навантажень, що відповідає кривим 1, 2, 3.

© С. О. Сідней

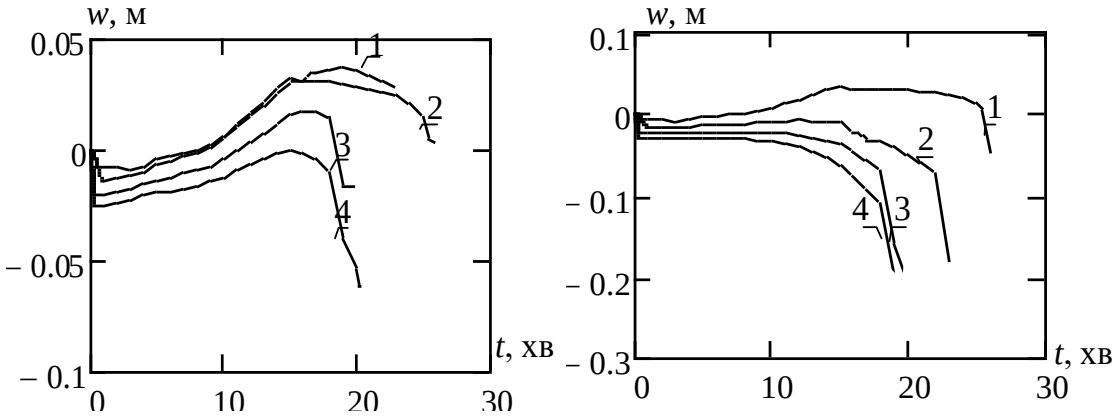


Рис. 8. Графіки максимального прогину залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі для різних значень діючого навантаження (1–30 %, 2–50 %, 3–70 %, 4–90 % від максимального навантаження): а – поздовжнього ребра; б – точки посередині панелі у комірці між ребрами

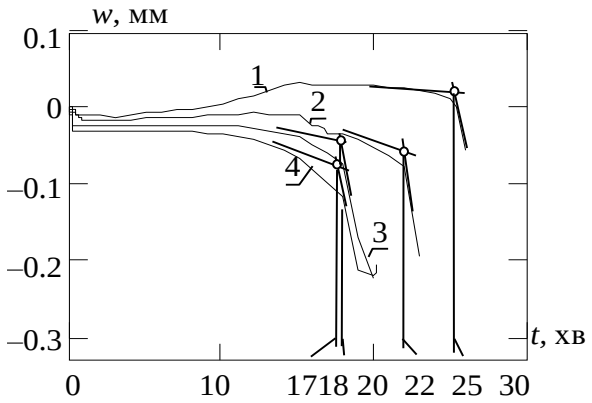


Рис. 9. Графіки максимального прогину точки посередині панелі у комірці між ребрами залізобетонної ребристої плити під впливом стандартного температурного режиму пожежі при різних значеннях діючого навантаження із встановленими межами вогнестійкості: 1 – 30 % від максимального навантаження; 2 – 50 % від максимального навантаження; 3 – 70 % від максимального навантаження; 4 – 90 % від максимального навантаження

Узагальнюючи отримані криві для визначення моменту настання граничного стану втрати цілісності, було обґрунтовано метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит на основі цього критерію.

1. Побудова геометричної моделі залізобетонної ребристої плити з врахуванням армування у тому числі у панелі конструкції, з метою відстеження настання нелінійних деформацій у комірках панелі плити між ребрами.

2. Генерування скінченно-елементної сітки, застосовуючи 8-вузлові гексаедричні скінченні елементи для моделювання бетону та 2-вузлові стрижневі скінченні елементи для моделювання сталевої арматури.

3. Теплофізичні та механічні властивості матеріалів конструкції, зокрема: бетону та арматури налаштувати за рекомендаціями [3].

4. Перед початком комп’ютерного моделювання сумісного термосилового впливу необхідно задати граничні умови для відтворення пожежі через конвекційний та радіаційний теплообмін. Також слід визначити рівень прикладання необхідного навантаження та умови закріплення ребристої плити.

5. За результатами проведеного статичного розрахунку слід проаналізувати отримані дані для визначення моменту початку нелінійної деформації у комірці

між ребрами ребристої плити, що є критерієм оцінювання вогнестійкості ребристих плит за втратою цілісності.

6. Обговорення результатів дослідження оцінювання вогнестійкості залізобетонної ребристої плити за втратою цілісності

На кривих рис. 4 можна побачити, що найбільше прогрівається арматура у панелі між ребрами, оскільки ця арматура має найменший захисний шар. Трохи повільніше температура у поперечних ребрах і найповільніше прогрівається арматура у поздовжніх ребрах, оскільки має найбільший захисний шар.

Графік на рис. 5 показує що межа вогнестійкості за настанням стану втрати теплоізолювальної здатності для даної плити становить 13 хв. Для плит покриттів це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується.

Було отримано цікаву картину нарощування вертикальних переміщень плити, що наведена на рис. 6. Як видно на рис. 6, при дії прикладеного силового навантаження (у даному випадку q_E=1,8 кН/м тобто 30 % від руйнуючого навантаження) плита має найбільші вертикальні переміщення посередині прольоту. При цьому зона найбільших вертикальних переміщень має круглу форму. Під час моделювання теплового впливу стандартного температурного режиму пожежі спочатку зона найбільших переміщень має форму еліпса витягнутого вздовж поздовжньої осі плити. На етапах тривалішого теплового впливу найбільші переміщення концентруються у комірках плити, утворених поздовжніми та поперечними ребрами.

Також на рис. 6 можна побачити, що під тепловим впливом пожежі ребриста плита поступово вигинається вверх. Це може бути пояснене температурним розширенням панелі між ребрами.

Наведені розподілення показують, що можливо втрата цілісності відбувається при руйнуванні панелі у комірках між поздовжніми та поперечними ребрами плити.

Аналізуючи розподіли пластичних напружень (рис. 7), можна побачити, що гіпотеза руйнування шару бетону у комірках, які утворюються між поздовжніми та поперечними ребрами залізобетонної ребристої плити, підтверджується, оскільки вони найбільше концентруються біля ребер.

Аналіз графіків на рис. 8 показує, що імовірно руйнування у поздовжньому ребрі плити можливе тільки при прикладенні навантаження більше 70 %, оскільки чіткий загин кривої максимального прогину можна спостерігати саме у цьому випадку. Проте, можна впевнено побачити, що панель у комірці між ребрами має чіткий виражений загин. Це означає, що у всіх випадках руйнування плити відбувається саме внаслідок руйнування панелі між ребрами. Отже, можна припустити, що граничний стан втрати цілісності настає через руйнування панелі між ребрами (в комірках), коли несуча здатність поздовжніх ребер ще зберігається. Це логічно, оскільки захисний шар бетону арматури в цих комірках найменший і складає лише 15 мм.

Враховуючи цю гіпотезу, передбачається можливість використання такого підходу як уточненого методу для оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за граничним станом втрати цілісності. За цим підходом можна використовувати криві типу графіків, поданих на рис. 9.

Таким чином, за результатами проведених досліджень обґрунтований уточнений метод оцінювання вогнестійкості залізобетонних ребристих плит за настанням граничного стану втрати цілісності. Це дозволить визначати вогнестійкість таких конструкцій за граничним станом з вогнестійкості втрати цілісності, що є гарантуванням недопущення утворення тріщин, крізь які можливе проникнення небезпечних чинників пожежі, протягом нормованого часу.

© С. О. Сідней

Особливість методу полягає у використанні сучасних інструментів моделювання для комплексного аналізу поведінки залізобетонних ребристих плит в умовах пожежі з ідентифікацією утворення наскрізних тріщин, що є основним критерієм втрати цілісності. Це підвищує точність оцінювання вогнестійкості таких конструкцій та дозволяє адаптувати метод до реальних експлуатаційних умов, що не можливо виконати під час проведення експериментальних досліджень.

При цьому існують певні обмеження під час проведення досліджень. Незважаючи на те, що моделювання проводилося за стандартним температурним режимом пожежі, найбільш точні показники вогнестійкості будівельних конструкцій можна отримати при застосуванні параметричної пожежі, що враховує особливості конфігурації будівлі та пожежне навантаження в приміщеннях, де встановлена конструкція.

Оцінювання вогнестійкості окремої залізобетонної ребристої плити, без урахування її взаємодії з іншими елементами будівлі (колонами, балками, перекриттями тощо), не дає повної картини про поведінку конструкції в умовах пожежі. Будівельні елементи взаємодіють між собою і можуть впливати на загальну стійкість споруди, особливо в разі пожежі.

У перспективі доцільно розглянути не лише окрему конструкцію, а й всю конструктивну систему будівлі в цілому.

Розвиток даного дослідження може полягати у вивченні поведінки всієї будівлі або окремих частин каркаса з урахуванням їхньої взаємодії під час пожежі, включаючи передачу навантажень між елементами (колонами, стінами, балками, плитами). Але при цьому збільшується складність математичних моделей через необхідність врахування численних взаємозв’язків між елементами, що потребує значні обчислювальні потужності для моделювання таких конструктивних систем.

7. Висновки

1. За результатами комп’ютерного моделювання впливу стандартного температурного режиму пожежі та механічного навантаження на залізобетонну ребристу плиту розв’язані теплотехнічна та статична задачі. Втрата теплоізолювальної здатності досліджуваній конструкції становить 13 хв, але для таких конструкцій це є допустимим, оскільки для них втрата теплоізолювальної здатності не нормується. Втрата цілісності плити зафіксована на 17-й, 18-й, 22-й та 25-й хвилинах відповідно до рівня прикладеного навантаження: 30 %, 50 %, 70 % та 90 % від максимального навантаження.

2. За результатами аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної ребристої плити визначено критерій для ідентифікації граничного стану втрати цілісності, а саме: початок нелінійних деформацій у панелі комірок між поздовжніми та поперечними ребрами. Це дозволило обґрунтувати метод оцінювання вогнестійкості за цим граничним станом.

Література

1. Nilimaa J. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the Built Environment. 2023. Vol. 15. P. 100177. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100177

2. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016 [Чинний з 01.06.2017]. Київ: ДП «УкрНДІЦЗ», 2016. 35 с.

3. Проектування залізобетонних конструкцій. Частина 1–2. Загальні положен-

ня. Розрахунок конструкцій на вогнестійкість (EN 1992-1-2:2004, IDT). Зміна № 1: ДСТУ-Н Б EN 1992-1-2:2012 Єврокод 2 [Чинний з 01.07.2014]. Київ: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2013. 131 с.

4. Сідней С., Некора О., Рудешко І., Березовський А., Костенко Т., Іщенко І. Дослідження вогнестійкості залізобетонної ребристої плити. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2023. Том 7 № 2. С. 217–226. doi: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.217.226

5. Кропива М. О. Удосконалення розрахункового методу оцінювання вогнестійкості сталезалізобетонних плит із внутрішніми двутавровими сталевими балками. 2016. Дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02. – Державний університет безпеки життєдіяльності, Львів.

6. Ренкас А. А. Забезпечення вогнестійкості залізобетонних багатопустотних плит перекриття із застосуванням листових будівельних матеріалів. Збірник наукових праць Пожежна безпека ЛДУ БЖД. 2019. № 34. С. 72–77. doi: 10.32447/20786662.34.2019.12

7. Ковальов А. І. Удосконалення методу оцінювання вогнезахисної здатності покривів залізобетонних перекриттів. 2012. Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.02 «Пожежна безпека» / УкрНДІЦЗ. Київ.

8. Perehin A., Nuianzin O., Shnal T., Shchipets S., Myroshnyk O. Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures. AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2684(1). 030032. doi: 10.1063/5.0120061

9. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. 2018. E3S Web of Conferences. Vol. 60. P. 00003.

10. Sidnei S., Myroshnyk O., Kovalov A., Veselivskyi R., Hryhorenko K., Shnal T., Matsyk I. Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. 2024. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 4 № 7. P. 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

11. Dzidic S. Fire Resistance of Reinforced Concrete Slabs. 2023. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1001046

S. Sidnei, *PhD, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

SPECIFIED METHOD OF ASSESSING THE FIRE RESISTANCE OF RIBBED PLATES BY LOSS OF INTEGRITY

An investigation was carried out to evaluate the immersion capacity of reinforced concrete ribbed slabs at the borderline stage of loss of integrity. EN 1992-1-2 has daily diversification methods for determining the limits and class of immersiveness of reinforced concrete slabs at the limiting point of loss of integrity (E). The scientific work is aimed at directly tracking the concentration of the two boundary conditions of the immersive capacity: non-bearing capacity (R) and thermal insulation capacity (I). Experimental testing is subject to criticism due to the difficulties of fixing the sign of the onset of the borderline stage of loss of integrity, despite the need to control the unheated surface of the ribbed slab after an hour. in the case of mechanical engineering. Even the methodology for carrying out destructuring before assessing the absorbency of reinforced-concrete ribbed slabs behind the boundary mill station loses no integrity. In order to ensure the safe evacuation of people in the event of a fire, the protection of more or unsafe officials, as well as the effective work of the military personnel, it is necessary to stagnate the civil servants design with guaranteed immersion resistance classes. The results of the most important thermal and static problems are presented, which are related to the distribution of temperature and the stress-

© С. О. Сідней

deformation process of a ribbed plate. Carrying out research into the ingressivity of reinforced-concrete ribbed slabs with the protection of the boundary mill at the loss of integrity has made it possible to establish the deposits between the insulation of these structures at a loss integrity depending on the level of applied mechanical strength. Removing the laying schedule makes it possible to evaluate reinforced concrete ribbed slabs based on the criterion of the moment of the boundary stage of loss of integrity, which makes it possible to evaluate more objectively the immersiveness of such future constructions.

Keywords: dangerous fire factors, fire resistance, ribbed slabs, through cracks, integrity, modeling

References

1. Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the Built Environment, 15, 100177. doi: 10.1016/j.dibe.2023.100177

2. State Enterprise "UkrNDICZ". (2016). Fire safety of construction sites. General requirements: DBN B.1.1-7:2016 [Effective from 01.06.2017]. Kyiv: SE "UkrNDICZ".

3. State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2013). Design of reinforced concrete structures. Part 1-2. General provisions. Calculation of structures for fire resistance (EN 1992-1-2:2004, IDT). Amendment No. 1: DSTU-N B EN 1992-1-2:2012 Eurocode 2 [Effective from 01.07.2014]. Kyiv: SE "State Research Institute of Building Structures".

4. Sidnei, S., Nekora, O., Rudeshko, I., Berezovskyi, A., Kostenko, T., Ishchenko, I. (2023). Research on fire resistance of reinforced concrete ribbed slab. Emergencies: Prevention and Elimination, 7(2), 217–226. doi: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.217.226

5. Kropyva, M. O. (2016). Improvement of the calculation method for assessing the fire resistance of steel-reinforced concrete slabs with internal I-beam steel girders (PhD dssertation, Lviv State University of Life Safety, Lviv).

6. Renkas, A. A. (2019). Ensuring fire resistance of reinforced concrete hollow-core slabs using sheet building materials. Collection of Scientific Works Fire Safety of Lviv State University of Life Safety, 34, 72–77. doi: 10.32447/20786662.34.2019.12

7. Kovalov, A. I. (2012). Improvement of the method for assessing the fire protection capacity of coatings of reinforced concrete floors (Abstract of PhD dissertation, UkrNDICZ, Kyiv).

8. Perehin, A., Nuianzin, O., Shnal, T., Shchipets, S., & Myroshnyk, O. (2023). Improvement of means for assessing fire resistance of fragments of reinforced concrete structures. AIP Conference Proceedings, 2684(1), 030032. doi: 10.1063/5.0120061

9. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., Savchenko, O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. E3S Web of Conferences, 60, 00003.

10. Sidnei, S., Myroshnyk, O., Kovalov, A., Veselivskyi, R., Hryhorenko, K., Shnal, T., Matsyk, I. (2024). Identifying the evolution of through cracks in iron-reinforced hollow slabs under the influence of a standard fire temperature mode. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(7), 70–77. doi: 10.15587/1729-4061.2024.310520

11. Dzidic, S. (2023). Fire resistance of reinforced concrete slabs. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.1001046

Надійшла до редколегії: 12.10.2024
Прийнята до друку: 16.11.2024

УДК 614.8

Д. П. Дубінін, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8948-5240)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ТОНКОРОЗПИЛЕНОЮ ВОДОЮ

В роботі представлено та обґрунтовано конструкцію та режим роботи вимірювального комплексу для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Вимірювальний комплекс складається з 5-ти комплексних датчиків вологості та температури, блоку обробки інформації з картою пам'яті та блоку живлення. Датчики підключаються до блоку обробки інформації (плати драйвера дисплею та слоту sd карти), який дозволяє обробити та записати отриману інформацію на карту пам'яті. Живлення вимірювального комплексу здійснюється від ноутбуку або повербанку, що підключаються до блоку обробки інформації. Обробка результатів вимірювань здійснюється за допомогою обчислювальної техніки (ноутбуку, планшету тощо) із заздалегідь встановленою програмою WPS Office або Microsoft Office. Зчитування інформації з датчиків відбувається кожну секунду, а загальний час вимірювання обмежується об'ємом карти пам'яті. Похибка вимірювань вологості та температури розробленим комплексом визначається виходячи з похибки вимірювань датчиків, що застосовуються. Для проведення вимірювань запропоновано схему де датчики розміщені на різних висотах та відстанях від осередку внутрішньої пожежі. За рахунок використання вимірювального комплексу здійснюється вимірювання показників температури та вологості при визначенні ефективності сучасних технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою, які забезпечують мінімальну витрату вогнегасної речовини, мобільність та мають просту конструкцію. За рахунок оцінювання ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою здійснюється визначення їх сфери використання, а за рахунок їх мобільності та автономності буде підвищено рівень безпеки особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж у тому числі в умовах ведення бойових дій.

Ключові слова: вимірювальний комплекс, тонкорозпилена вода, внутрішня пожежа, ефективність, технічний засіб пожежогасіння

1. Вступ

Механізм гасіння тонкорозпиленою водою (ТРВ) полягає в охолодженні зони горіння, зниженні теплового випромінювання від полум'я пожежі та концентрації кисню в зоні горіння [1]. При цьому слід зазначити, що вогнегасна ефективність ТРВ залежить від розміру крапель (дисперсності) та інтенсивності подавання ТРВ. Ці познаки визначають ефективність технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою [2, 3].

В роботах [4, 5] проведені попередні чисельні дослідження щодо особливостей процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії з подальшим її подрібненням ударною хвилею. Але здійснити оцінку ефективності технічних засобів пожежогасіння ТРВ при гасінні внутрішньої пожежі буде можливе за рахунок проведення вимірювань параметрів роботи технічних засобів пожежогасіння ТРВ (дисперсність крапель води, інтенсивність подавання вогнегасної речовини, тощо) та показників газового середовища при розвитку внутрішньої пожежі. На цей час застосовуються різні засоби вимірювання для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння, такі як тепловізори, газоаналізатори, термопари, анемометри, ультразвукові витратоміри, тощо. Але слід зазначити що кожен з цих засобів використовується індивідуально. У зв'язку з чим виникає необхідність у розробці вимірювального комплексу для визначення ефек-

© Д. П. Дубінін

тивності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою (далі – вимірювальний комплекс), який дозволить одночасно здійснювати вимірювання показників температури та вологості в залежності від часу при розвитку внутрішньої пожежі. Що, насамперед, дозволить оцінити ефективність технічних засобів пожежогасіння ТРВ при гасінні внутрішньої пожежі.

Актуальність створення вимірювального комплексу викликано потребою подальшого розвитку технічних засобів з отримання та доставки ТРВ в осередок пожежі з метою підвищення ефективності їхнього застосування.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Вимірювання показників ефективності технічних засобів пожежогасіння ТРВ є дуже актуальним питанням при проведені їх порівняльної оцінки та визначені відповідних вимог до гасіння пожеж різного класу. Так в роботі [6] проведені експериментальні дослідження системи пожежогасіння ТРВ в умовах задимлення та в системах вентиляції при гасінні модельного осередку пожежі класу «А» в приміщенні розмірами 12,0×4,0×3,5 м. Для контролю за газовим середовищем використовувалися три термопари, один детектор концентрації диму та один газоаналізатор, при цьому контроль газоаналізатора та доступ до нього здійснювався за допомогою програмного забезпечення COMFORT3 через картку ПК. За результатами проведених досліджень встановлено залежність часу гасіння пожежі від швидкості вентиляції при пожежі. Проведені досліджені були направлені на повне припинення горіння при гасінні ТРВ, при цьому розповсюдження ТРВ та її поступовий вплив в приміщені не враховувався, так як чотири форсунки були розміщені по довжині приміщення.

В роботі [7] проведені дослідження, в яких використовувалася експериментальна установка, що складалася з випробувальної камери, опорних каркасів сховища, горючих матеріалів, джерела вогню, системи ТРВ (форсунки, трубопроводи та насос) та системи діагностики (датчиків температури, хронометру та системи збору даних), а також мобільних та стаціонарних відеокамер для фіксації розвитку пожежі. За результатами досліджень встановлено, що основним показником за яким відбувався контроль це температура в приміщені та її зміна при застосуванні ТРВ. При цьому слід зазначити, що такі показники як вологість та швидкість поширенням ТРВ в приміщенні при дослідженнях не враховувалися.

В роботі [8] проведені дослідження із застосування ТРВ для гасіння пожежі класу «А» передбачали застосування експериментальної установки ТРВ, що включала форсунки ТРВ, термопари та тензодатчик. За результатами досліджень встановлено оптимальний розмір отвору у форсунках для гасіння пожежі, а також такі показники, як розподіл об’ємного потоку, розмір крапель ТРВ та швидкість втрати маси твердого горючого матеріалу при пожежі, однак близьке розміщення термопар та форсунок до осередку пожежі не дозволяють здійснити оцінку газового середовища за об’ємом в приміщенні, що значно знижує можливість, щодо визначення параметрів роботи технічних засобів ТРВ.

В роботі [9] проведені експериментальні дослідження щодо гасіння ТРВ пожежі класу «В», під чого здійснено вимірювання таких параметрів, як розподіл крапель туману за розміром і швидкість сопла за допомогою системи PDPA, температуру за допомогою термопар і концентрацію газу за допомогою газоаналізатора. Отримані результати досліджень насамперед визначають ефективність систем пожежогасіння низького та високого тиску при їх використанні. Але системи пожежогасіння середнього тиску в дослідженнях не розглядалися.

Тому, проведення досліджень, щодо обґрунтування конструкції та параметрів роботи вимірювального комплексу для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння ТРВ є невизначеною частиною проблеми.

3. Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи є обґрунтування та розробка вимірювального комплексу для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– науково-технічно обґрунтувати конструктивні особливості та параметри вимірювального комплексу;

– розробити техніку проведення вимірювань та методику обробки результатів вимірювання за допомогою вимірювального комплексу.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є вимірювальний комплекс для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Предметом дослідження – конструктивні особливості та параметри роботи вимірювального комплексу.

Основною гіпотезою є використання вимірювального комплексу з урахуванням його конструкції та технічних характеристик щодо визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою шляхом порівняння зміни вологості та температури під час розвитку внутрішньої пожежі. Обчислення отриманих результатів дослідження здійснюється за допомогою офісного пакету програмного забезпечення WPS Office або Microsoft Office.

5. Обґрунтування конструктивних особливостей та параметрів роботи вимірювального комплексу

Конструкція вимірювального комплексу представлена на рис. 1. Вимірювальний комплекс складається з блоку обробки інформації (1) (плати драйвера дисплею та слоту sd карти), живлення якого здійснюється за рахунок ноутбуку (2) (повербанку), що під’єднується за допомогою кабелю USB Type A – USB Type C (3). Вимірювання показників вологості та температури здійснюється датчиками (4), які підключені комплектним кабелем (5) до блоку обробки інформації (1). Отримана інформація з датчиків щодо вимірювання показників вологості та температури передається та зберігається на карті пам’яті (6). Опрацювання отриманої інформації щодо вимірюваних показників вологості та температури здійснюється за рахунок вилучення карти пам’яті (6) з блоку обробки інформації (1) та встановлення її в ноутбук (2).

На рис. 2 представлено загальний вид блоку обробки інформації, який є основним пристроєм вимірювального комплексу, на дисплеї в послідовному порядку відображаються така інформація як, назва файлу в який здійснюється запис даних (1), час останнього вимірювання в мілісекундах від включення (2), кількість вимірювань здійсненних за час включення приладу (3), номера датчиків (загальна кількість датчиків 5 штук) (4), останнє значення вологості виміряне кожним датчиком (5), останнє значення температури виміряне кожним датчиком (6), кількість втрачених пакетів даних (7).

Вимірювання показників вологості та температури здійснюється за допомогою датчиків типу DHT22 Temperature and Humidity sensor, який складається з

© д. п. дубінін

модуля датчика, конектора RJ-11 6P4C, печатної плати адаптера інтерфейсу датчика та печатного корпусу для кріплення плати до конектора.

Рис. 1. Вимірювальний комплекс для визначення ефективності технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою: 1 – блок обробки інформації; 2 – ноутбук (повербанк); 3 – кабель USB Type A – USB Type C; 4 – датчики для вимірювання вологості та температури; 5 – комплектний кабель; 6 – карта пам'яті

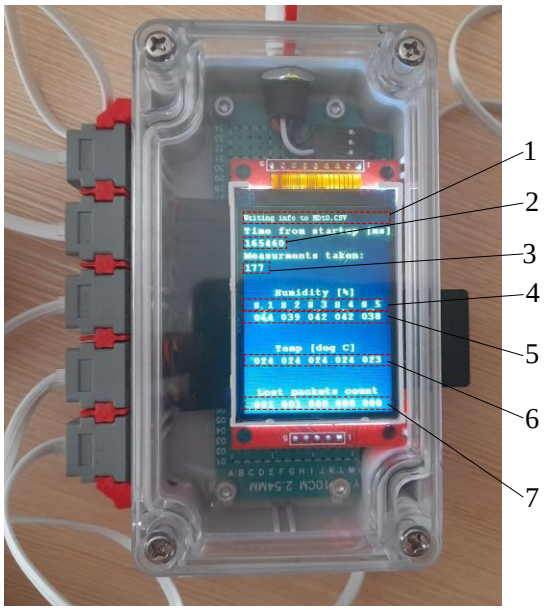


Рис. 2. Блок обробки інформації вимірювального комплексу: 1 – назва файлу в який здійснюється запис даних; 2 – час останнього вимірювання в мілісекундах від включення; 3 – кількість вимірювань здійсненних за час включення приладу; 4 – номера датчиків; 5 – останнє значення вологості виміряне кожним датчиком; 6 – останнє значення температури виміряне кожним датчиком; 7 – кількість втрачених пакетів даних

DHT22 Temperature and Humidity sensor – цифровий датчик для визначення температури та вологості у навколишньому середовищі, що має більш високий рівень точності вимірювання та ширший діапазон вимірюваних значень (вологість від 0 % до 100 %, температура від –40° С до 125° С). Напруга живлення складає 3,3 – 5 В, струм – 2,5 мА, частота дискретизації трохи більше 0,5 Гц (один раз на 2 с), точність вимірювання вологості – ± 2 % RH, точність вимірювання температури – ± 0,5° С.

Блок обробки інформації вимірювального комплексу (плати драйвера дисплею та слоту sd карти) складається з пластикового корпусу, дисплею 2.2 TFT Colorful Display та мікроконтролеру типу STM32F303CCT6.

2.2 TFT Colorful Display відображає якісну картинку з 18 біт кольору (262144 відтінків) за обробку відповідає контролер ILI9341, а підсвічування здійснюється за допомогою чотирьох LED діодів з підтримкою ШІМ. Напруга живлення становить 3,3 В. Споживання струму засноване на використанні світлодіодного підсвічування: при повному підсвічуванні споживання становить 90 мА. Робоча температура –20 ºС...60 ºС. Додатково на модулі дисплея встановлено роз'єм для SD-картки, який використовується для зберігання та завантаження зображень на дисплей. Висновки для підключення картки SD безпосередньо до мікроконтролера виведені окремо, на протилежну від основних контактів сторону. Також дисплей має вбудовану мікросхему SPI Flash пам'яті для зберігання графічних елементів.

Мікроконтроллер загального призначення STM32F303CCT6 на інтерфейсній платі. Максимальна частота роботи 72 МГц, 32-біт ядро Cortex-M4F, об'єми flash до 256 Кб, SRAM до 48 Кб 12 каналів DMA контролера 32-біт, до 4-х швидких АЦП (0,2 мкс), до 39 каналів, до 7 аналогових компараторів, до 4-х ОУ з програмованим коефіцієнтом підсилення. Інтерфейси USB 2.0 FS, CAN 2.0, HDMI до 5 USART, до 3 SPI, 2×I2S, 2×I2C, HDMI (CEC), до 17 таймерів 16/32 – біта, апаратні годинники реального часу (RTC), напруга живлення від 2 до 3,6 В.

Інформація з датчиків, щодо вимірювань показників вологості та температури зберігається на карті пам'яті типу Kingston microSDHC 32GB Canvas Select Plus Class 10 UHS-I U1 V10 A1 + SD-адаптер (SDCS2/32GB). Перед використанням карти пам'яті необхідно здійснити її форматування в файловій системі FAT32 з розміром кластеру 4096. При ініціалізації пристрій рахує кількість файлів вже записаних на карту та якщо їх кількість не досягла максимальної (256 файлів) створюється файл назва якого продовжує їх нумерацію.

Живлення вимірювального комплексу здійснюється від ноутбуку або повербанку, який підключається до блоку обробки інформації за допомогою кабелю USB Type A – USB Type C.

Обчислення та опрацювання результатів вимірювання здійснюється за допомогою обчислювальної техніки (ноутбуку, планшету, тощо) із заздалегідь встановленим офісним пакетом програмного забезпечення WPS Office або Microsoft Office.

Проведення експериментальних досліджень, щодо застосування вимірювального комплексу здійснюються за принциповою схемою, що наведена на рис. 3.

Проведення досліджень здійснюється в наступній послідовності. Збирається конструкція з поліпропіленових труб діаметром 32 мм відповідно до рис. 3. При цьому загальна довжина конструкції складає 6 м, що містить три труби (6) по 2,0 м на якій розташовані датчики для вимірювання вологості та температури (5) у кількості 5 штук на відстані 1,5 м один від одного, що підключені до блоку обробки інформації (3) за допомогою комплектного кабелю (4), який знаходиться в середині, а труби (7) в конструкції дозволяють змінювати розміщення датчиків в приміщенні (8) за висотою 1,0 м, 1,5 м та 2 м, що дозволяє здійснити вимірювання в різних точках приміщення. Конструкція з труб з інтегруванням датчиків збирається в приміщенні, а вимірювальний комплекс знаходиться ззовні. Ствол технічного засобу пожежогасіння тонкорозпиленою водою (10) знаходиться в приміщенні та при запуску вимірювального комплексу здійснюється подача водяного струменя ТРВ (11) при цьому розташування конструкції запобігає попаданню крапель струменя ТРВ на датчики (5).

© д. п. дубінін

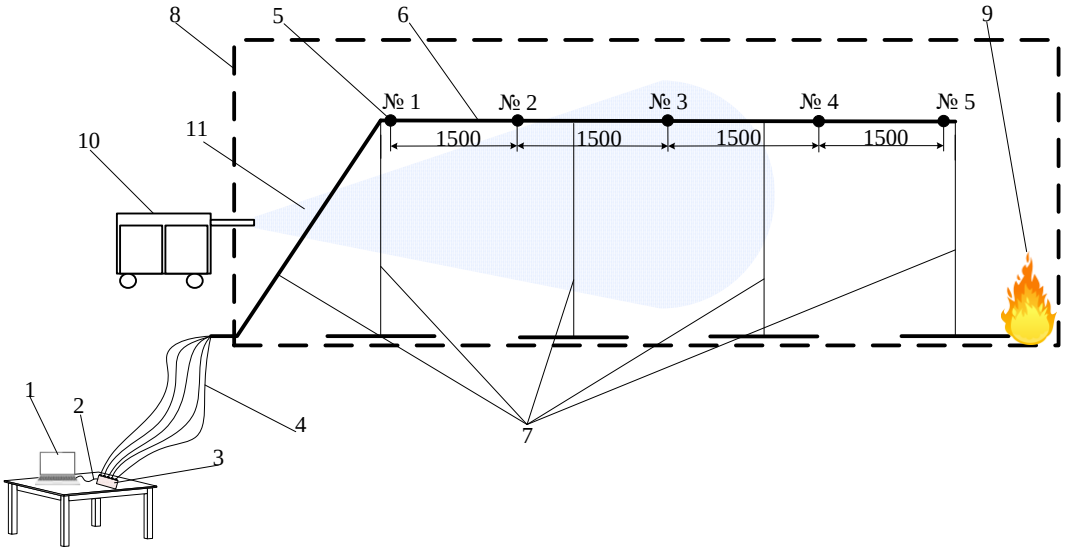


Рис. 3. Принципова схема для проведення експериментального дослідження за допомогою вимірювального комплексу: 1 – ноутбук (повербанк); 2 – кабель USB Type A – USB Type C; 3 – блок обробки інформації; 4 – комплектний кабель; 5 – датчики для вимірювання вологості та температури; 6 – конструкція з пластикових труб довжиною 2,0 м; 7 – конструкція з пластикових туб довжиною 1,0; 1,5 та 2,0 м; 8 – приміщення; 9 – осередок горіння; 10 – технічний засіб пожежогасіння ТРВ; 11 – струмінь ТРВ

Включення вимірювального комплексу при проведенні досліджень здійснюється в наступній послідовності. Датчики для вимірювання вологості та температури (5) інтегровані в збірну конструкцію з поліпропіленових труб та підключені комплектним кабелем (4) до блоку обробки інформації (3), при цьому підготовлена карта пам'яті (форматована) вставлена в отвір блоку обробки інформації (3), який підключено до ноутбуку (повербанку) 1 за допомогою кабелю USB Type A − USB Type C (2). Після чого здійснюємо підпалювання модельного осередку пожежі (9) та включаємо ноутбук (1) і починаємо здійснювати подачу водяного струменя ТРВ (11) з технічного засобу пожежогасіння (10) в середину приміщення і в залежності від етапу вимірювання повторюємо у такій послідовності. Після завершення досліджень припиняємо подачу водяного струменя ТРВ та вимикаємо блок обробки інформації від'єднуючи від джерела живлення. Карту пам'яті з інформацію з результатами досліджень вилучаємо з блоку обробки інформації та підключаємо карту пам'яті до ноутбука та здійснюємо подальше опрацювання та обчислення збережених файлів з результатами досліджень.

6. Техніка обчислення результатів вимірювання за допомогою вимірювального комплексу

Після закінчення вимірювань вологості та температури за допомогою вимірювального комплексу, оператор вилучає з блоку обробки інформації карту пам'яті та встановлює її у слот під карту пам'яті в ноутбуці. При відкритті карти пам'яті відображаються файли з відповідною назвою, наприклад «HDT0, 1, 2…» (рис. 4).

Відкривши файл «HDT0» з'являється інформація, що отримана за результатами вимірювань (рис. 5). Горизонтально відображена інформація стосовно показників вимірювання, таких як «Milliseconds From Startup – мілісекунди», «RH (Humidity) – вологість», «T (temperature) – температура», «S_1…5 – датчики», а вертикально наведені значення вимірювання вологості та температури в залежності від часу вимірювання з усіх 5-ти датчиків.

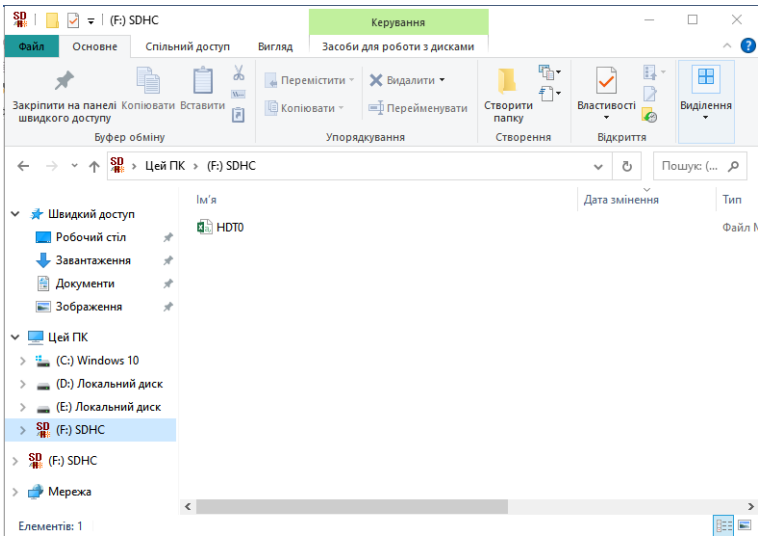


Рис. 4. Збережений файл на карті пам'яті за результатами вимірювання

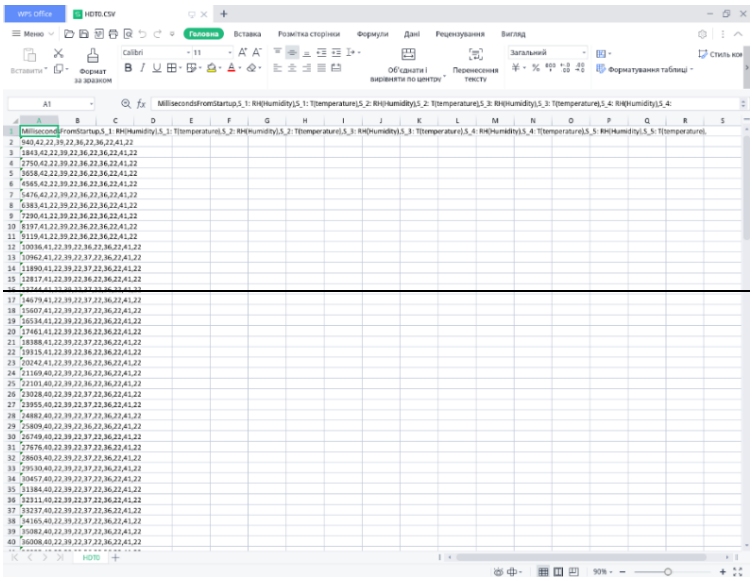


Рис. 5. Отримані результати вимірювання показників вологості та температури з 5-ти датчиків файлі в залежності від часу

Отриманні значення вологості та температури опрацьовуємо за допомогою офісного пакету програмного забезпечення WPS Office або Microsoft Office у вигляді побудови графіків та діаграм. На рис. 6 побудовано графік отриманих значень вологості в залежності від часу з 5-ти датчиків з кроком вимірювання 1 с, де кожне вимірювання з датчику виділено відповідним кольором.

З рис. 6 видно зміну значень вологості за часом, де температура на 5-ти датчиках залишається постійною та складає 22 °С, при цьому мінімальне значення вологості складає 28 %, максимальне – 84 %, це обумовлено, насамперед, розташуванням датчиків в різних місцях приміщення. При використанні вимірювального комплексу при розвитку внутрішньої пожежі значення з 5-ти з датчиків за температурою та вологістю будуть суттєво відрізнятися, так як вони будуть розміщенні між собою на визначеній відстані відповідно до рис. 3. За отриманими результатами вимірювань можна дослідити залежність температури та вологості від часу, що дозволить оцінити ефективність технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою при розвитку внутрішньої пожежі.

© Д. П. Дубінін

7. Обговорення результатів досліджень, отриманих при використанні вимірювального комплексу

Проведені дослідження дозволили обґрунтувати конструктивні особливості та параметри роботи вимірювального комплексу. Порівнюючи роботу вимірювального комплексу, наприклад з тепловізором, який дозволяє фіксувати температуру тільки в визначеному місці, з сучасними засобами вимірювання (термопара, газоаналізатор, ультразвуковий витратомір, анемометр тощо) то тут постає одне важливе питання, як висока вартість. З рахуванням цього вимірювальний комплекс дозволяє визначити комплексно зміну вологості та температури під час розвитку внутрішньої пожежі. Але застосування вимірювального комплексу обмежується технічними характеристиками датчиків DHT22 Temperature and Humidity sensor, а саме максимальною температурою, яка складає 125 °C, але ця технічна складова вирішується за рахунок використання інших датчиків. В подальшому в конструкцію вимірювального комплексу необхідно внести технічні зміни щодо вимірювання складу газового середовища при розвитку пожежі.

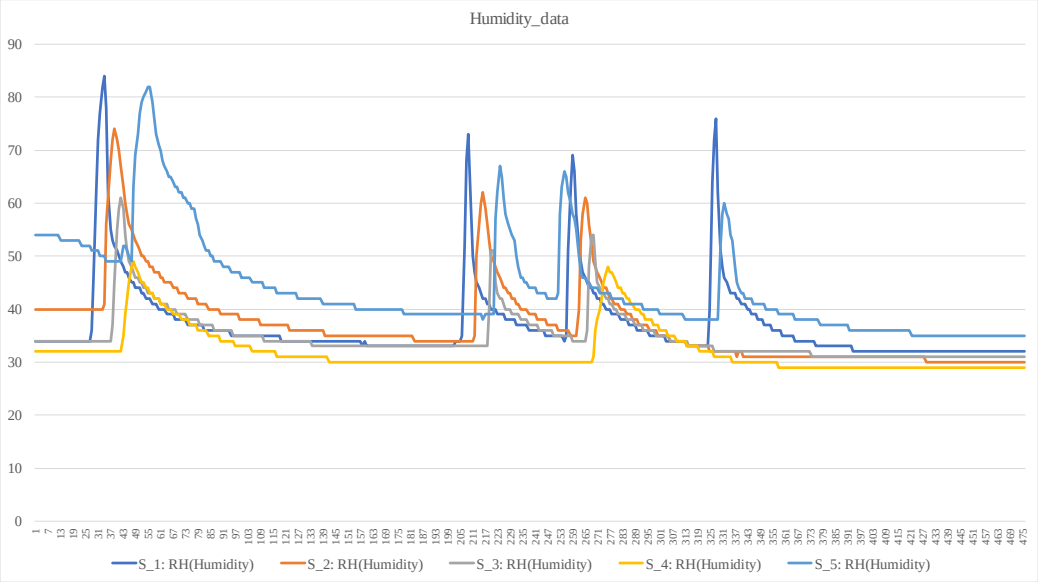


Рис. 6. Графік вологості RH (Humidity) вимірювальним комплексом

Отримані результати дослідження дозволяють оцінити кожний технічний засіб пожежогасіння в залежності від таких показників, як інтенсивність подавання вогнегасної речовини, клас пожежі, дисперсність або розмір крапель води. В якості технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою можуть використовуватися установки та системи пожежогасіння високого тиску – при тиску 34,5 бар або більше [10]; середнього тиску – при тиску більше 12,1 бар, але менше 34,5 бар [10]; низького тиску – при тиску 12,1 бар або менш [10]; пожежні ручні стволи високого тиску, що подають вогнегасну речовину від пожежно-рятувальних автомобілів [11, 12]; мобільні установки та засоби пожежогасіння [13–15]. Проведені дослідження є основним етапом для підтвердження попередніх чисельних досліджень, математичного моделювання та випробування технічних засобів пожежогасіння перед початком їх експлуатації.

8. Висновки

1. Обґрунтовано конструктивні особливості та параметри роботи вимірювального комплексу для визначення ефективності технічних засобів

пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Встановлено, що в приладі для визначення показників вологості та температури в залежності від часу є датчики типу DHT22 Temperature and Humidity sensor, що підключені до блоку обробки інформації (плати драйвера дисплею та слоту sd карти), який складається з дисплею 2.2 TFT Colorful Display, мікроконтролеру типу STM32F303CCT6 та здійснює отримання та зберігання інформації у вигляді файлу на карту пам'яті, при цьому живлення вимірювального комплексу здійснюється від ноутбуку або повербанку.

2. Обчислення та опрацювання отриманих результатів вимірювання вологості та температури здійснюється за допомогою офісного пакету програмного забезпечення WPS Office або Microsoft Office у вигляді побудови графіків та діаграм. Так на побудованому рис. 6 видно зміну значень вологості за часом, де температура на 5-ти датчиках залишається постійною та складає 22 °С, при цьому мінімальне значення вологості складає 28 %, максимальне – 84 %, це обумовлено, насамперед, розташуванням датчиків в різних місцях приміщення. За отриманими результатами вимірювань можна дослідити залежність температури та вологості від часу, що дозволить оцінити ефективність технічних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою при розвитку внутрішньої пожежі.

Література

1. Дубінін Д. П. Дослідження вимог до перспективних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 33. С. 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2

2. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. Process Safety and Environmental Protection. 2020. 141. P. 344–354. doi: 10.1016/j.psep.2020.05.043

3. Liu Y., Fu Z., Zheng G., Chen P. Study on the effect of mist flux on water mist fire extinguishing. Fire Safety Journal. 2022. 130. P. 103601. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103601

4. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Криворучко Є. М., Рагімов С. Ю., Тригуб В. В. Особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 38. С. 69–79. doi: 10. 10.52363/2524-0226-2023-38-5

5. Dubinin D., Korytchenko K., Krivoruchko Y., Tryfonov O., Sakun O., Ragimov S., Tryhub V. Numerical studies of the breakup of the water jet by a shock wave in the barrel of the fire extinguishing installation. Sigurnost. 2024. 66 (2). P. 139–150. doi: 10.31306/s.66.2.4

6. Liu W.-Y., Chen C.-H.,Shu Y.-L., Chen W.-T., Shu C.-M. Fire suppression performance of water mist under diverse desmoking and ventilation conditions. Process Safety and Environmental Protection. 2020. 133. P. 230–242. doi: 10.1016/j.psep.2019.10.019

7. Santangelo P. E., Tartarini P. Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems. Applied Thermal Engineering. 2012. 45–46. P. 99–107. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.011

8. Santangelo P. E., Jacobs B. C., Ren N., Sheffel J. A., Corn M. L., Marshall A. W. Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires. Fire Safety Journal. 2014. 70. P. 98–111. doi: 10.1016/j.firesaf.2014.08.012

© д. п. дубінін

9. Hamzehpour A., Verda V., Borchiellini R. Experimental study of extinguishing shielded fires by a low-pressure multi-orifice water mist nozzle. Fire Safety Journal. 2024. 146. P. 104175. doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104175

10. NFPA 750. Standard on Water Mist Fire Protection Systems, 2023.

11. Rosenbauer International AG. URL: https://www.rosenbauer.com

12. AWG Fittings GmbH. URL: https://awg-fittings.com

13. 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. 2/10(92). P. 8–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

14. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Slepuzhnikov E., Nikorchuk A., Tsebriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gasdetonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 3/5(93). P. 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

15. IFEX GmbH. URL: https://www.ifex3000.com

D. Dubinin, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

MEASURING COMPLEX FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT WITH FINE SPRAY WATER

The work presents and substantiates the design and operation mode of the measuring complex for determining the effectiveness of technical means of fire extinguishing with finely sprayed water. The measuring complex consists of 5 integrated humidity and temperature sensors, an information processing unit with a memory card and a power supply unit. The sensors are connected to the information processing unit (display driver board and sd card slot), which allows you to process and record the received information on a memory card. The measuring complex is powered by a laptop or power bank connected to the information processing unit. Processing of measurement results is carried out using computing equipment (laptop, tablet, etc.) with the pre-installed WPS Office or Microsoft Office program. Information is read from the sensors every second, and the total measurement time is limited by the memory card. The error of humidity and temperature measurements by the developed complex is determined based on the measurement error of the sensors used. For measurements, a scheme is proposed where the sensors are placed at different heights and distances from the center of the internal fire. Due to the use of the measuring complex, temperature and humidity indicators are measured when determining the effectiveness of modern technical means of fire extinguishing with fine spray, which ensure minimal consumption of extinguishing agent, mobility and have a simple design. By evaluating the efficiency of technical means of fire extinguishing with finely sprayed water, their scope of use is determined, and due to their mobility and autonomy, the level of safety of the personnel of fire and rescue units during fire extinguishing, including in the conditions of combat operations, will be increased.

Keywords: measuring complex, finely sprayed water, internal fire, efficiency, technical means of fire extinguishing

References

1. Dubinin, D. (2021). Doslidzhennja vymog do perspektyvnyh zasobiv pozhezhogasinnja tonkorozpylenoju vodoju. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 33, 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2

2. Liu, Y., Wang, X., Liu, T., Ma, J., Li, G., Zhao, Z. (2020). Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. Process Safety and Environmental Protection, 141, 344–354. doi: 10.1016/j.psep.2020.05.043

3. Liu, Y., Fu, Z., Zheng, G., Chen, P. (2022). Study on the effect of mist flux on

water mist fire extinguishing. Fire Safety Journal, 130, 103601. doi: 10.1016/j.firesaf.2022.103601

4. Dubinin, D., Korytchenko, K., Kryvoruchko, Je., Ragimov S., Trygub, V. (2023). Osoblyvosti procesu zapovnennja vodoju stvola ustanovky pozhezhogasinnja periodychno-impul'snoi' dii'. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 38, 69–79. doi: 10.10.52363/2524-0226-2023-38-5

5. Dubinin, D., Korytchenko, K., Krivoruchko, Y., Tryfonov, O., Sakun, O., Ragimov, S., Tryhub, V. (2024). Numerical studies of the breakup of the water jet by a shock wave in the barrel of the fire extinguishing installation, Sigurnost, 66 (2), 139–150. doi: 10.31306/s.66.2.4

6. Liu, W.-Y., Chen, C.-H.,Shu, Y.-L., Chen, W.-T., Shu, C.-M. (2020). Fire suppression performance of water mist under diverse desmoking and ventilation conditions, Process Safety and Environmental Protection, 133, 230–242. doi: 10.1016/j.psep.2019.10.019

7. Santangelo, P. E., Tartarini, P. (2012). Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: A temperature-based analysis of water-mist systems, Applied Thermal Engineering, 45–46, 99–107. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.04.011

8. Santangelo, P. E., Jacobs, B. C., Ren, N., Sheffel, J. A., Corn, M. L., Marshall, A. W. (2014). Full-scale experiments of fire suppression in high-hazard storages: Suppression effectiveness of water-mist sprays on accelerated wood-crib fires, Fire Safety Journal, 70, 98–111. doi: 10.1016/j.firesaf.2014.08.012

9. Hamzehpour, A., Verda, V., Borchiellini, R. (2024). Experimental study of extinguishing shielded fires by a low-pressure multi-orifice water mist nozzle, Fire Safety Journal, 146, 104175. doi: 10.1016/j.firesaf.2024.104175

10. NFPA 750. (2023). Standard on Water Mist Fire Protection Systems.

11. Rosenbauer International AG. Available at: https://www.rosenbauer.com

12. AWG Fittings GmbH. Available at: https://awg-fittings.com

13. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely-dispersed water. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies, 2/10 (92), 8–43. doi:10.15587/1729- 4061.2018.127865

14. Korytchenko, K., Sakun, O., Dubinin, D., Khilko, Y., Slepuzhnikov, E., Nikorchuk, A., Tsebriuk, I. (2018). Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gasdetonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/5(93), 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

15. IFEX GmbH. Available at: https://www.ifex3000.com

Надійшла до редколегії: 11.10.2024
Прийнята до друку: 12.11.2024

© д. п. дубінін

UDK 614.84

D. Tregubov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0003-1821-822X)*
O. Kireev*[1]*, *DSc, Professor, Professor of the Department (ORCID 0000-0002-8819-3999)*
K. Kyazimov*[2]*, *PhD, Deputy Chief for Educational and Scientific Work (ORCID 0000-0003-0790-9770)*
L. Trefilova*[1]*, *DSc, Senior Researcher, Professor of the Department (ORCID 0000-0001-8939-6491)*
E. Slepuzhnikov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Head of the Department (ORCID 0000-0002-5449-3512)*
S. Vavreniuk*[1]*, *DSc, Professor of the Department (ORCID 0000-0002-6396-9906)*
[1]*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*
[2]*Academy of the Ministry of Emergency Situations, Baku, Republic of Azerbaijan*

FIRE EXTINGUISHING DEVELOPMENT DIRECTIONS FOR LIQUIDS BASED ON THE FOAM GLASS PRIMARY LAYER

The combustible liquid modulating parameter was established to predict the foam glass fire-extinguishing layer as the primary means for liquids ensuring reliable fire extinguishing in combination with other fire-extinguishing means. The formation peculiarities and buoyancy indicators of dry and wet foam glass in polar and non-polar liquids (alkanes and alcohols) were investigated. It is shown that the foam glass buoyancy increases with an increase in the liquid density. The foam glass buoyancy in polar and non-polar liquids was described depending on the liquid density by an approximate linear dependence separately for dry and wet foam glass. The deviation from the linear trend is explained by the foam glass different wettability, some alcohols water solubility, and liquid mixtures peculiarities. The buoyancy relation with flash point was established, which works separately for n-alkanes, n-alcohols and glycols, which was described mathematically. A formula was developed to describe the relationship between flash temperatures and the liquids density. Correlations with a fire-extinguishing layer of dry foam glass for molar mass, molecule or cluster length, stoichiometric combustion reaction coefficient, burning rate on a free surface, density, flash point, boiling point, autoignition temperature were studied. The forecasting possibility the dry foam glass fire-extinguishing layer based on the description of flammable liquids clusters has been established. Mathematical dependences were obtained for the dry foam glass fire-extinguishing layer depending on the expected clusters length in the liquid and a similar dependence for flash points. The conditions for effective extinguishing of alcohols and alkanes with dry foam glass have been determined. Different modes of extinguishing hydrocarbons with flash temperatures t_{fp}<28 °C and t_{fp}>28 °C are recommended, based on the primary layer of 6 cm of wet foam glass with a fraction of 1.0–1.5 cm, with the possibility of finalizing the extinguishing, if necessary, with an inorganic gel by spraying components with an application rate of 0.2 g/cm^2.

Keywords: fire extinguishing, flammable liquid, cluster, foam glass, buoyancy, isolation, cooling, gel, consumption

1. Introduction

Worldwide fire statistics show the class "B" fires widespread prevalence. During the war, this problem worsened. Improving facilities fire safety with the circulation or storage of flammable liquids and rescue units ensuring the efficiency during the class "B" fires elimination are work important areas for the SESU. Extinguishing Class "B" fires with a significant free liquid surface area is one of more difficult firefighting problems, both in the case of extinguishing tanks and emergency spills. Such fires are characterized by their duration, significant material and environmental damage, the dangerous factors presence for the human life, and difficult conditions for extinguishing. [1].

The more common ones include fires involving petroleum products of class "B1". Modern technical petroleum products (alcohol-containing gasoline) contain polar additives, which brings their combustion regimes closer to "B2" fires and imposes appropriate restrictions on the fire-extinguishing foams use. The petroleum products main list can be classified as flammable liquids with a flash point of t_{fp} < 61 °C. That is, they can

be classified as those that, under typical storage conditions at a certain air temperature and (or) the thermal radiation action, heat up to t_{fp} and independently form vapor which ignition capable. Regulatory requirements allow the installation of tanks with a volume of up to 120.000 $м^3$ [2], but the means for extinguishing them have disadvantages. Therefore, extinguishing oil products can be attributed to the most large-scale and complex fire extinguishing cases. Currently, extinguishing such fires is carried out using various chemical nature foams. But these means are either not effective enough, expensive, or environmentally unacceptable. Therefore, scientific and practical research continues to search for alternative ways to extinguish class "B" fires.

Thus, the providing fire protection problem with a reliable, inexpensive, environmentally friendly means of extinguishing class "B" fires, which does not contaminate flammable liquids and will be universal for both class "B1" and "B2" fires, both for tanks and for emergency spills, remains unresolved.

2. Analysis of literature data and problem statement

All known extinguishing mechanisms are used to extinguish liquid fires: cooling (of flammable liquid or flame), isolation (including shielding), dilution (of both the gas space and the liquid), flame inhibition [1]. But at present, the existing scientific developments level does not allow replacing foam fire extinguishing in many cases [3]. In this direction, the granular closed-pore solid materials use (as a floating system) turned out to be a promising solution, among which foam glass (FG) has proven itself well in model fires [4]. Granular FG satisfies most of above requirements as a fire extinguishing agent for liquids. But as an individual extinguishing agent, FG works only for high-boiling liquids, and in other cases, the such a solution implementation requires the extinguishing completion by other means. There are many possibilities for stopping combustion weakened by the FG floating layer. These can be both means used to extinguish solid combustible materials, and developments for extinguishing liquids. The only thing that remains is the ban on using a compact water jet to extinguish class "B1" fires.

The main factor in successfully extinguishing liquids fires is ensuring a balance of insulating and cooling properties of the extinguishing material in contact with the burning liquid surface [5]. In practice, this is done without control by feeding either low multiplicity film-forming fluorosynthetic fire-extinguishing foams or medium multiplicity other origin foams [4]. Film-forming foams form a “light water” layer on the liquid surface and isolate the evaporation surface better than other foams, but are expensive, pollute the liquid, and are environmentally unacceptable [6]. Nevertheless, they are currently the dominant foam firefighting technology. Perhaps their use together with FG will significantly reduce their consumption for extinguishing, but this has not been studied. In addition, the polar liquids fire extinguishing problem has not been finally solved, and this depends significantly on their water solubility [7]. Also poorly studied is the medium-multiplicity foams behavior on the granular FG surface, although previous experiments have shown the accumulation and retention possibility of an isolating foam layer on the FG surface. The fire-extinguishing efficiency of medium-multiplicity foams is increased by the urea addition [8], which most likely has an inhibitory effect on the flame, increases the foam stability, and promotes decomposition into non-flammable gases.

Completion of flame quenching above the FG layer can be accomplished by inhibiting, diluting, or cooling the flame. This is usually difficult to implement for extinguishing liquids with a large burning area, but possible for slow burning. That is, it is necessary to create a cloud of water aerosol, pyrotechnic fire extinguishing aerosol, general-purpose

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

powder, or non-flammable gas that will simultaneously cover the flame entire volume. Flame suppression with aerosol inhibitors is especially relevant for polar liquids, which remains a difficult problem for modern firefighting [9]. However, for a powerful flame, this is difficult to do. Under wind loads, this task becomes more difficult even for a weak flame. Therefore, to extinguish severe combustion in tanks, it is proposed to carry out sublayer combustion of the aerosol-forming composition with simultaneous nitrogen supply [10], the proportionality of the aerosol supply intensity to the reduction in the thermal radiation of alcohols up to extinction defined [11]. But the aerosol part will be lost during the "bubbles" rising and contaminate the liquid, the method is not suitable for emergency spills (i.e., it is not universal), and sublayer agents delivery systems often fail. Therefore, an alternative method of supplying a similar system have developed – directly into the flame under a pressure of 10 atm [12], which can also be implemented for FG. Based on the fire extinguishing agents comparison that supply into the flame volume: non-flammable gases, general-purpose powders, and gas-aerosol agents, researchers concluded that the latter are superior in terms of efficiency, cost-effectiveness, and supply ease [13]. In aerosol fire extinguishing, a new direction has emerged: extinguishing with microencapsulated gel-like liquids, which reduces water loss and provides cooling, dilution, and inhibition effects [14]. In the integrated use case of this agent together with FG, it is easier to overcome powerful convection currents near a developed flame.

Also considered is an extinguishing method with CO_2 granules sublayer supply, which cools the liquid entire volume, not just the surface (this reduces the method effectiveness) and the CO_2 gas phase dilutes the combustion zone [10]. When supplying granules to the liquid surface – they first sink, and then float up when the average diameter decreases to 3 mm (floated by their own gases). It is possible to choose an FG layer that will hold these granules, but the liquid surface cooling will be weakened, but the gasification of the granules will increase. A similar problem will arise in the supplying liquid nitrogen case, which has a certain effectiveness for extinguishing liquids [15].

It is theoretically possible to extinguish liquids with water spray, and it is recommended that for particularly flammable liquids, the droplet dispersion be 0.1 mm, and for others, 0.5 mm [16] to prevent the transformation of a water-insoluble liquid into foam that burns and flows outward. In the FG base layer case on the liquid surface, there is no such problem. On the one hand, the greater water dispersion (small droplets) allows for increased cooling and flame extinguishing efficiency, on the other hand, it is difficult to create a water aerosol with such dispersion simultaneously throughout the flame over a simultaneous burning large area, especially taking into account convection flows near the flame and possible wind loads. Above the FG base layer, when the combustion is weakened, it is easier to provide fire extinguishing conditions, and a coarser aerosol can be applied, which will provide moisture to the FG. The flame extinguishing effectiveness is increased by water fine spraying [17], by adding sodium bicarbonate or other flame inhibitors to the solution [18], by adding film-forming foaming agents (water mist is another way of forming a water film on the liquids surface), and by simultaneously adding an inhibitor and a film-forming agent [19, 20]. In the FG layer presence, the surfactant role changes: it allows for a finer water aerosol and increases FG wetting. The water aerosol fire-extinguishing effect on a flame is well calculated mathematically [21], but in the complex effect case due to certain additives, predicting fire-extinguishing efficiency becomes more difficult.

Regarding specific means of improving the FG fire extinguishing effect, the following can be distinguished. First, it is the FG pre-wetting with water [4]. In this case,

the buoyancy and insulating capacity of FG are reduced, while the cooling capacity increases several times (depending on the liquid temperature), and extinguishing is achieved with a FG smaller layer. But for low-boiling liquids with low density, this worsens the extinguishing effect (the fire-extinguishing layer FG increases), and then another means is required to complete the fire extinguishing.

Secondly, the FG isolating effect enhancement was investigated by applying an inorganic gel, the reaction product between 10 % solutions of calcium chloride and liquid glass, which is carried out during extinguishing, with a feed rate of 0.1–0.2 g/cm^2 depending on the residual flame intensity above the FG [4]. At the same time, calcium and chlorine ions create an inhibitory effect. For pentane, one of the most volatile non-polar liquids, this reduces the FG fire-extinguishing layer from 50 to 12 cm. The gel allows solving the problem of tank sides cooling efficiency increasing [22], which is usually done by water jets [23]. But the gel, as a water-containing substance (like general-purpose foams), is of little help in extinguishing water-soluble polar liquids: the evaporation delay is reduced from 30 to 3 times. In addition, coating the FG with gel makes it difficult to reuse the FG for extinguishing.

Since the gel use as an additional means when extinguishing class "B" fires has the specified limitations, it is proposed to strengthen the isolation with a FG layer by compacting its surface with solid materials small fractions with low density [24]. This can be FG, perlite or vermiculite with a granule size of up to 5 mm. But this size FG has poor buoyancy – the external open pores proportion increases, so two other materials were investigated. Gasoline extinguishing was achieved with a FG base layer 4 cm. This system all components can be reused. The method is suitable for extinguishing both non-polar and polar liquids.

Inhibitor granules can also be applied to the FG layer, or the FG itself can be treated with flame retardants in a dry powder or liquid state. Researchers have followed a similar path with perlite and vermiculite, which they treat with an inhibitor [25]. But the inhibitor particles possibility from the liquid surface getting into a large flame remains questionable. Therefore, it is more likely to achieve extinguishing if such systems are applied to the FG layer, when the combustion is already weakened due to insulation and cooling.

Liquids extinguishing existing studies by FG-based systems do not focus on the selected extinguishing modes universality for different chemical nature liquids and rely on the t_{fp} indicator, which in some cases gives an extinguishing incorrect expectation. Therefore, it is relevant to conduct scientific research to substantiate the feasibility of selecting one or another means of completing fire extinguishing to create a universal binary means based on FG.

Thus, a considered scientific problem unsolved part is the method improvement the extinguishing of liquids based on the FG base layer by combining it with other means to ensure efficiency, environmental friendliness, and versatility.

3. The purpose and tasks of the research

This work purpose is to establish a modulating liquids parameter for predicting the foam glass fire-extinguishing layer as a base to ensure liquids reliable fire extinguishing in combination with other fire extinguishing means.

To achieve the set purpose, the following tasks solution is provided:

– to determine the foam glass buoyancy as a base layer for the fire extinguishing for polar and non-polar liquids;

– to identify the liquids extinguishing parameters dependence with foam glass on their properties.

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

4. Research materials and methods

The research object is extinguishing liquids fires with foam glass-based agents.

The research subject is the correlation between the liquids parameters and the foam glass fire-extinguishing layer.

The research hypothesis is the identifying possibility of the such liquids parameter among such as flash point, boiling point, molar mass, combustion reaction stoichiometric coefficient, molecular skeleton length, cluster length, by which the foam glass fire-extinguishing layer can be predicted.

The research method is to conduct an experiment on a class "B" laboratory model fire on the use of dry or wet foam glass for the fire extinguishing, as well as on the extinguishing completion with an inorganic gel, followed by the search for correlations with certain substance parameters.

Foam glass (FG) is investigate as a fire extinguishing agent for liquids. In this research, the FG floating layer is considered as the basic one, which either provides extinguishing or provides for the extinguishing completion by any other fire extinguishing method of surface or volumetric action. For this aim, a comprehensive experiment is planned, which involves establishing the difference in the buoyancy of dry and wet FG in polar and non-polar liquids, operations on wetting FG, experiments on extinguishing liquids with the foam glass, and completing extinguishing by forming the isolating gel layer on the FG layer. For experiments, crushed FG with the following characteristics was selected: granule size 1–1.5 cm, true density 186 kg/m^3; apparent density 105 kg/m^3; water retention 29±4 %; heat capacity 0.78 kJ/(kg·K). The wetted FG formation was carried out by filling it with water and pressing it with a load for complete immersion under a water layer. After 1 min of holding, the FG was placed on a grid, where 5 min of excess water free outflow, which the external pores were unable to stably hold, was ensured. Under such conditions, the FG absorbs and retains up to 50% of water from its total mass.

The starting components for the gel formation system (GFS) were prepared by dilution. First, a saturated solution was prepared from the technical $CaCl_2$. After that, a 10 % solution was prepared by the gravimetric method. A 10 % solution of the liquid sodium glass was prepared by the dilution. The solutions concentration was controlled by density using the hydrometric method. Household OP-2 spray guns were used to supply GFS components in aerosol form. The sprayed liquid droplets diameter was 0.2–0.5 mm, and the total flow rate was 0.2 g/cm^2. The gel forms during the aerosols reaction, settles and adheres to surfaces.

A metal cylindrical container with a diameter of 11.2 cm and S_{fire} =98.5 cm^2 was used as a laboratory model of a class "B" fire. After pouring 250 ml of the flammable liquid into a container, a layer of 2.5 cm was formed. After igniting the fire model, the entire system mass loss was determined using the gravimetric method. Weighing was performed on a "TNV-600" continuous measurement electronic scale with an accuracy of 0.01 g. Measurements were performed at standard atmospheric pressure and ambient temperature of 18±2 °C. After 2 min of the fire model free burning, FG was applied to the liquid surface with a 2 cm layer. After 1 min of steam burning through the FG layer, after the flame size stabilized, the system mass loss was recorded at 30 s intervals for 3 min. The measurements were repeated adding the next 2 cm of FG layer. The measurement results converted into mass burnout rate, g/(m^{2}s). The experiment final result is the FG layer determination at which combustion ceases.

The FG layer relationship with liquids various properties is subject to analysis: flash point t_{fp}, boiling point t_{bp}, molar mass M, combustion reaction stoichiometric coefficient, molecule skeleton length, cluster length.

5. Foam glass buoyancy determination depending on liquid properties

The conducted analysis showed that the t_{bp} of most n-alkanes and n-alcohols fit into a smooth dependence [26, 27]. Therefore, the growth rate of the air vapor pollution zone formation in homologous series should also have a smooth dependence. But t_{fp}, mass burnout rate and other parameters of combustion and substances fire hazard are characterized by oscillation and stepwise nature, which is explained and modeled by us as a clustering consequence in the flame according to the peroxide mechanism with the various supramolecular structures formation in a homologous series [26–28]. Approaches to preventing or stopping the vapor cloud formation and to fire extinguishing may differ slightly for the same liquid. Usually, the extinguishing agent consumption for the liquids fire is divided into several modes depending on the t_{fp}, but a research interesting direction is the search for another criterion for predicting the fire-extinguishing isolating layer, which takes into account possible nonlinearities at hydrocarbons homologous series.

One such parameter may be the mass burnup rate V_m. But the V_m illogical behavior in the n-alcohols homologous series draws attention. It was expected that V_m would be proportional to t_{bp} or t_{fp}. But it turned out that this parameter formation is much more complicated – it is the factors complex action result: t_{fp}, t_{bp}, autoignition temperature t_{ai}, lower flammability limit LFL, molar mass, but this parameter oscillations presence in the homologous series requires taking into account melting point t_{mp} (but the mass evaporation rate does not have oscillations, which indicates a peroxide cluster structure in the flame). According to reference data, n-butanol has a higher V_m, but in the experiment, n-heptanol, which can be explained by better surfaces wettability. Interpretation of experimental results is hampered by the water content in different proportions in different technical alcohols, which is determined by the azeotropy point (the t_{bp} of rectified alcohol is 0.3 °C lower than t_{bp} of chemically pure alcohol). But here too there is an anomaly: it was expected that the water content would reduce the V_m value, as t_{fp} and t_{ai} increase, i.e. the conditions for the formation of the flammable vapor and its ignition worsen (in practice, the opposite is true).

Currently, the extinguishing direction of liquids based on solid floating granular agents, for example, FG, is developing. During burnout, the liquid surface has a t_{mp}, but during insulation, it decreases. If the main mechanism for stopping combustion is the cooling, then the corresponding effect is achieved by cooling the surface to less than t_{fp}. The FG layer same value provides approximately the same surface cooling and evaporation isolation, but these effects determine a different fraction of the t_{bp} and LFL, so the decrease in V_m during the FG layer accumulation is not completely synchronous. The water content creates many slowing factors for the combustion process: t_{fp} and t_{ai} increase, lower LFL, water vapor phlegmatizes the combustion zone, the combustion heat and flame temperature decrease, and can increase the freeboards steel surfaces wetting, which increases the combustion area and V_m (but there is no such effect during FG supply).

For any flammable liquids, there is a FG fire-extinguishing layer, but for more volatile ones, such as pentane, it reaches 70 cm. Therefore, a compromise option for extinguishing is to use FG as a primary fire-extinguishing floating non-combustible layer, above which the weakened combustion still continues. The easiest way to improve the FG fire extinguishing properties is to wet it with water or an inhibitor solution with a single-stage application. This reduces the FG buoyancy, i.e. the non-submerged (insulating) total layer part, and increases the submerged (cooling) part. Wet FG cools the burning liquid surface 5 times better than dry FG, and has a fire-extinguishing layer 1–2 cm smaller. The buoyancy of 0.46–0.76 dry and 0.44–0.74 wet

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

FG in alcohols is much greater than in alkanes: for dry 0.36–0.58, for wet FG 0.31–0.49 [4], which is proportional to the liquids densities (Fig. 1).

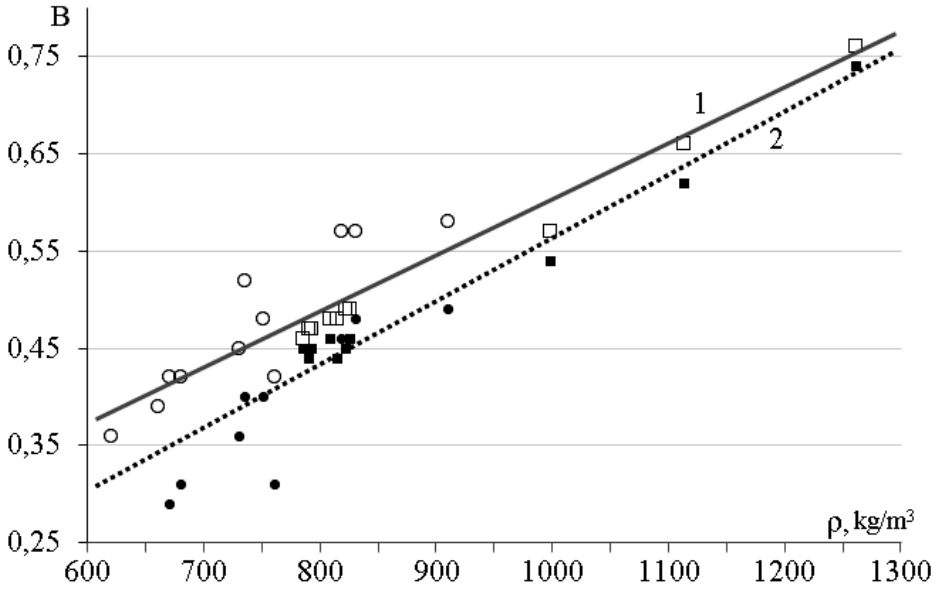


Fig. 1. Foam glass buoyancy depending on the liquids density: 1, ○, □ – dry FG; 2, ●, ■ – wet FG; ○, ● – alkanes, □, ■ – alcohols

Fig. 1 shows the buoyancy in liquids: water; alkanes – pentane, heptane, octane, decane, dodecane, petroleum ether, white spirit, gasoline, kerosene, diesel fuel, engine oil; alcohols – methanol, ethanol, isopropanol, n-butanol, n-pentanol, n-heptanol, n-octanol, ethylene glycol, glycerin. The buoyancy dependence of dry and wet FG on the liquid density in the first approximation is described by equations: B_{dry}=0.0006ρ+0.0266, B_{wet} =0.0007ρ–0.1297.

If we compare liquids with the same molecular skeleton length, then in alcohols the buoyancy is much higher (in butanol – 0.48, in pentane – 0.36), and if we look at the density, then in alkanes the dry FG buoyancy is somewhat higher (in dodecane – 0.48, in methanol – 0.47), and the wet FG buoyancy is somewhat lower (in dodecane – 0.4, in methanol – 0.45). From dependences profile in Fig. 1, white spirit stands out the most, which has a density of 770 kg/m^3 and is an alkanes technical mixture. In pentane, wet FG can be considered non-buoyancy. This shows that the FG wettability by alkanes is greater than that by alcohols with the same density. In addition, the cooling processes of the burning liquid surface by supplying wet FG will vary depending on this liquid temperature: up to 100 °C – slow heating of water; up to 120 °C – slow boiling; above 120 °C – rapid boiling with splashing hot water droplets.

It is also interesting to investigate the relationship between the liquids basic parameter of the fire extinguishing t_{fp} with buoyancy and with the liquid density, as a related parameter (Fig. 2). Since the FG buoyancy determines the mechanism and effectiveness of its use for the fire extinguishing, it seemed promising to obtain common dependencies. No generalized dependencies were obtained, which indicates the conventionality of using t_{fp} as a basic parameter for the FG flow rate normalizing for the fire extinguishing. Nevertheless, there are dependencies within homologous series: for n-alkanes – B=0.001(t_{fp} + 60) +0.3399, ρ=1.1239(t_{fp}+ 60) + 9.,21 kg/m^3; for n-alcohols – B=0.0003(t_{fp}+ 60)+0.4521, ρ=0.438(t_{fp}+60)+763.41 kg/m^3, where "60 °C" is the liquids conditional lowest t_{fp}. Thus, an equation was obtained for the FG buoyancy predicting based on the information on the density or flammable liquid t_{fp}.

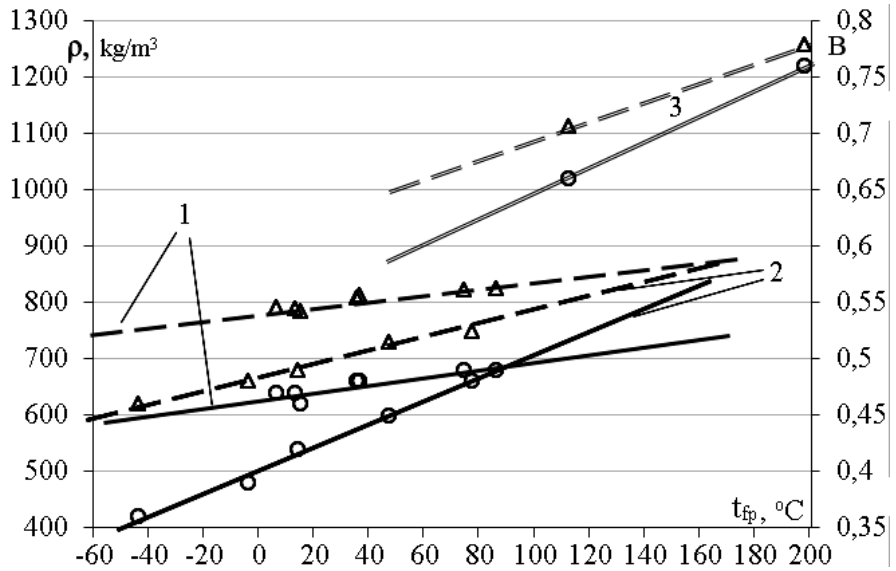


Fig. 2. Relationship between the liquids density (---,Δ) and the dry FG buoyancy (—,○) with the liquids t_{fp}: 1 – n-alcohols from methanol to octanol; 2 – n-alkanes from pentane to octane; 3 – polyhydric alcohols (ethylene glycol, glycerin)

The formation of a primary FG layer on a burning liquid creates sufficient conditions for the extinguishing reliable completion by many methods, most of which do not contaminate the liquid. A simpler, more effective and economical solution is to extinguish with a 4 cm wetted FG layer or to complete the extinguishing by applying a gel layer with a consumption of 0.2 g/cm^2.

6. Extinguishing parameters dependence identification of liquids with foam glass on their properties

The isolating and cooling agents effectiveness in the liquids burning stopping can be assessed by reducing the evaporation mass rates $V_{m(e)}$ and burnout $V_{m(b)}$. If, by cooling, the liquid surface temperature is ensured to be < t_{fp} or a certain fire extinguishing substance isolating layer is accumulated, then the evaporation intensity will become less than the critical one, and the vapor concentration will become less than the LFL, so combustion will become impossible [29]. That is, fire extinguishing by isolating or cooling the surface should slow down evaporation to achieve a vapor concentration less than LFL Then it is possible to introduce the theoretical evaporation retardation coefficient K_{ev}, which must be provided: for example, for the t_{bp}, the liquids vapor concentration is 100 %, for gasoline LFL ≈1 %, i.e., it is necessary to slow down evaporation by 100 times.

The dry FG action first effect on the liquid surface is cooling, but for low-boiling liquids it is insignificant – about 5 °C, which reduces the saturated vapor pressure by only 10–12 kPa and a similar fraction of the concentration. The FG direct isolating effect has 2 components: reducing the evaporation area and slowing down the steam diffusion into the combustion zone, with the first component being the main one. The non-flammable particles presence on the liquid surface reduces, and FG particles wetting with a flammable liquid slightly increases the evaporation area (particles contact points act as capillaries), so the resulting reduction in the evaporation area can be estimated as 50 %. The vapor concentration above the surface decreases proportionally (the $V_{m(e)}$ decreases) and a certain K_{ev} is reached.

For practical use, it is desirable to know which liquid parameter can be relied on to predict the FG reserve for forming a basic fire-extinguishing layer for different ho-

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

mologous classes liquids. In the foam firefighting practice, this is a liquid t_{fp}. To establish such compliance, it is necessary to conduct a research of the FG fire extinguishing effect for liquids with similar key parameters.

Regarding the extinguishing mechanism, granular closed-pore FG provides effective fire extinguishing only for high-boiling liquids (starting with t_{fp} >100 °C, the dry FG fire-extinguishing layer is 4–6 cm). The FG additional insulating effect is that it shields the liquid surface from flame radiation, with the flame and its heat flux already reduced due to the cooling and isolation stages. Extinguishing gasoline (hexane) requires accumulating a dry FG layer of 0.5 m thick, which is not technologically feasible. Therefore, an extinguishing option with a dry FG base layer 12 cm and extinguishing completion by adding an inorganic gel isolating layer with a total consumption of 0.2 g/cm^2 was developed, which ensures an evaporation slowdown by another 30 times. Then the FG contribution to the reduction in evaporation intensity was 70 % (3.3 times). Wet FG has a greater cooling effect, water vapor dilutes the burning zone, water from the submerged FG layer dilutes flammable water-soluble liquids. Therefore, we recommend extinguishing hydrocarbons with t_{fp}>28 °C with a wet FG base layer 6 cm of fraction 1.0–1.5 cm, which is sufficient to stop the burning or requires the extinguishing completing with an inorganic gel with an application rate of 0.2 g/cm^2; for hydrocarbons with t_{fp} <28 °C the wet FG base layer is 12 cm, which is sufficient to stop burning or requires the gel – of 0.45 g/cm^2.

For a more detailed study of the isolation and cooling contributions by the FG layer, an experiment was conducted on the extinguishing of the polar liquid – n-heptanol, which has an anomalously increased $V_{m(b)}$ through the FG layer among all alcohols [30]), in comparison with the extinguishing of alkanes which have similar t_{bp}, t_{fp}, molar masses M (n-octane, n-decane, n-dodecane) (Tab. 1).

The heptanol anomaly disappears for FG layers close to fire-extinguishing ones: with such a thickness of the FG layer, the burning process already occurs according to the evaporation principle – higher $V_{m(b)}$ through the FG layer are observed for alcohols with lower t_{bp}. A higher t_{fp} simplifies fire extinguishing by cooling the liquid surface with a FG layer. A higher t_{bp} increases the starting surface temperature during extinguishing. A higher t_{ai} is not directly related to the extinction effect, but makes it more difficult to re-ignite from a hot surface. A higher β determines a higher oxygen requirement, which makes combustion more difficult and extinguishing easier. A larger M is related to the factors described, but does not correlate with β molecules with different oxygen contents. For heptanol and dodecane, the main extinguishing mechanism when FG is applied is the liquid surface cooling (according to Tab. 1, a significant decrease in the saturated vapor pressure P_{sv}), and for octane and decane, the evaporation isolation to the combustion zone. There is an effective cooling depth that determines the lowest FG consumption for the fire extinguishing – a layer of 6 cm (≈3 cm of the submerged part), which is typical for liquids with t_{fp} >100 °C. Therefore, a 6 cm thick FG layer can be considered basic for the liquid fires extinguishing based on this agent. Based on this layer, it is possible to decide on further tactics for the completing extinguishing: wetting the FG, flame extinguishing agents, adding the FG layer as a floating carrier for inorganic isolating gel or other substances. A FG base layer is sufficient for extinguishing high-boiling liquids.

The residual K_{ev} after the cooling stage the liquid surface by the FG layer is the largest for n-decane, but this did not determine the most difficult conditions for its extinguishing, which can be associated with the large M, and therefore with the slower

diffusion of the vapor through the granular FG layer. The lower the liquid t_{bp}, the greater the residual P_{sv} and the required K_{ev}, the closer the liquid cluster structure will be to the monomeric state (for example, for hexane). That is, the FG isolating capacity is related to the M, and the cooling capacity (in addition to the heat capacity) is related to the t_{bp} and liquid density. Therefore, given the complex action of isolating fire extinguishing means which contact with a surface engulfed in flames, there cannot be a single indicator with which the fire extinguishing ability of a given agent for a substances wide range would be correlated.

Tab. 1. Flammable liquids characteristics [31] and their extinguishing with dry foam glass

Parameter	n- heptanol	n-octane	n-decane	n-dodecane
t_{bp}, °C	176	126	174	216
t_{fp}, °C	74	14	47	77
t_{ai}, °C	275	215	210	202
$t_{bp} - t_{fp}$, °C	102	112	127	139
Δt_{coolFG}*, °C	14.74	7.73	14.36	24.7
$P_{sv\ residual}$, кПа	64.4	84.1	72.2	54.3
$\varphi_н$, %	1	0.9	0.7	0.63
$K_{ev\ residual}$	64.4	93.4	103.1	86.2
M, g/mol	116	114	142	170
ρ, kg/m^3	821.9	680	730	750
β	8	12,5	15,5	18,5
n_{C+OH}	8	8	10	12
n_{Ceq} in liquid	29	16	20	24
n_{Ceq} in flame	12	17	15.5	16.5
B	0.49	0.42	0.45	0.48
h_{FG}, cm	8–10	10–12	7–9	5–6

* – $\Delta t=4{,}1e^{0{,}013t-1}$, °C [5].

There is a FG layer values range within which for the heptanol and octane extinguishing effect may be achieved. At such layers, weak combustion is observed, which may be extinguished either at slightly smaller FG layers or, with a weak flame, will be observed at slightly larger FG layers. The prolonging weak combustion effect with an FG layer increase can be associated with the hydrodynamic resistance disappearance in narrow channels between particles of a FG fraction at low pressures and vapor concentrations of the flammable liquid. Then the final extinction when dry FG is applied is a consequence of the liquid surface shielding by this layer from the flame thermal radiation. This effect will be stronger if the white FG is used. Among the liquids studied, heptanol has the highest density and buoyancy (B) of dry FG; then for it, with the same FG layer, the FG isolating part will be larger.

Close values of t_{fp} for dodecane and heptanol did not result in the same fire extinguishing layer FG (6 cm versus 10 cm), although the t_{fp} is the is the aim for the surface cooling. Close values of t_{bp} for decane and heptanol brought the $V_{m(b)}$ closer together – for decane, the values are smaller and extinguishing occurs with a smaller FG layer (8 cm). Close values of M for octane and n-heptanol gave a close fire extinguishing layer FG – 10 cm, but they have different extinguishing mechanisms. Also, these compounds have the same molecular skeleton length, which suggests that at the fire extinguishing beginning, when the liquid surface has a t_{bp}, evaporation occurs with the monomer state same characteristics.

It was expected that there might be a correlation of the fire-extinguishing layer for FG or other isolating means for class “B” fires with the $V_{m(b)}$, but it turned out that for

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

alcohols from methanol to n-heptanol there is an anomaly: instead of this parameter expected decrease, it increases [30]. The parameter $V_{m(b)}$ can be considered as the mass evaporation rate at t_{bp}, but intensified due to the heat flux from the flame to the liquid surface. The evaporation intensity even in one homologous series is also affected by the even-odd molecules phenomenon according to the carbon atoms number in the carbon chain. For example, a zigzag dependence is observed for $V_{m(b)}$ in the homologous series of both alkanes and alcohols [30]. Previously, the various dependencies zigzag pattern in homologous series for certain physicochemical parameters we explained by the cluster structure alternation observed for the solid and liquid states, in flames and aqueous solutions [32]. Tab. 1 shows the molecules predicted framework lengths of studied substances, in liquid and flame. The correlation with the FG fire-extinguishing layer is more noticeable for the molecular state, which can be explained by the fact that the burnout process occurs in a boiling state. But for substances such as glycerin and ethylene glycol, this principle does not work (frame lengths of 5 and 4, and dry FG extinguishing layer – 3 and 4 cm).

In view of the above, an additional study was conducted of the extinguishing process with dry FG of some alkanes, alcohols, glycols and in the presence of water in the liquid in order to find a correlation with supramolecular structures lengths (Fig. 3).

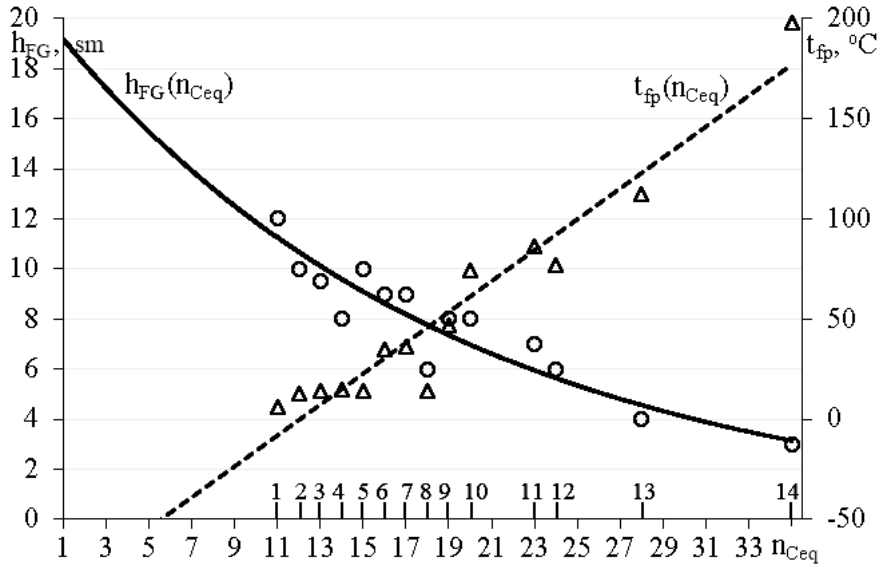


Fig. 3. Correlation of the liquid state clusters equivalent length with the extinguishing layer FG thickness (—, ○) and the liquid flash point (---, Δ): 1 – methanol, 2 – ethanol, 3 – isopropanol, 4 – isopropanol (1.5 % water), 5 – n-octane, 6 – n-butanol, 7 – n-pentanol, 8 – ethanol (4 % water), 9 – n-decane, 10 – n-heptanol, 11 – n-octanol, 12 – n-dodecane, 13 – ethylene glycol, 14 – glycerin

The burnout liquids process is accompanied by a transition from liquid state structures to gaseous state structures with the peroxide complexes formation in the air. Therefore, it is currently not possible to clearly determine which of these structures will predominate in influencing the burnout process. The chosen approach assumes a dimeric structure for alkanes, starting with octane, for alcohols – a tetrameric structure (for methanol – a hexameric), for glycerin and ethylene glycol – a heptameric, for pentane, hexane, heptane – a monomeric, technical ethanol is modeled as a tetramer with the addition of 4 links of intermediate water molecules, technical isopropanol – as an aqueous dimer of an alcohol dimer (a tetramer with 2 additional links of water molecules). It should be noted that spectrometry detects clusters up to the octamer size in alcohols [33]. Based on processing experimental data results on class "B" model fires ex-

tinguishing, a dependence was obtained for the extinguishing layer FG depending on the expected clusters equivalent length n_{Ceq}, as well as the correlation $tsp(n_{Ceq})$:

$$h_{FG}=20.212e^{-0,053nCeq}, R^2=0.89. \quad (1)$$

$$t_{fp}=7.6972\ n_{Ceq}–92.769, R^2=0.93. \quad (2)$$

This method error main component is determined by the fact that modeling principles of the clusters structure are indirect. Technical ethanol, which contains the most water, deviates the most from general dependences. Moreover, the cluster modeling variability does not help here: a small t_{fp} implies a short cluster, a small FG extinguishing layer – a long cluster. The weak correlation of dependencies shown in Fig. 3 in the form of formulas (1) and (2) is also determined by the fact that the extinction moment has a probabilistic component. Depending on the FG particles arrangement randomness in the layer and the channels formation between them, the extinguishing moment may occur with a slightly smaller or larger FG layer.

7. Study results discussion of the extinguishing of liquids by means based on a foam glass

The conducted experimental studies allowed us to establish the extinguishing action proportions of binary means components based on FG and the substance supramolecular structure influence on fire extinguishing. To do this, we relied on the FG buoyancy index in this flammable liquid as a determining factor of its insulating ability, and on the determined cooling effect by the FG layer on polar and non-polar flammable organic liquids artificially heated to different temperatures. This made it possible to establish new relationships between the liquids density, their flash point, buoyancy, the supramolecular clusters length, and the FG fire-extinguishing layer. The fire extinguishing layer FG is inversely proportional to the average cluster length of the flammable liquid during extinguishing, which depends on the primary cooling proportion by the FG layer.

The chosen approach to studying the fire extinguishing of liquids using FG-based means allowed us to clearly separate the successively implemented parts of the cooling and insulating action of FG, the sufficiency and necessity of such action, as well as the additional agent use intensity to the complete fire extinguishing. This result was achieved by introducing a theoretical evaporation retardation coefficient for analyzing the agent effect, the share of which is satisfied by the actual evaporation retardation coefficient due to a certain agent's action component. In addition, previous works [4, 10, 12, 13, 16, 18] did not justify the modulating indicator use, which can be used to select the extinguishing agent supply intensity for different liquids, and by default used the flash point. This paper conducts this issue detailed study and establishes relevant correlations.

At the research first stage, the FG buoyancy in alcohols and alkanes of the normal structure and some of their technical mixtures was determined. Buoyancy determines the amount of isolating and cooling action that an FG layer has, and the second component mass as a binary fire extinguishing system that the FG can hold without immersion in flammable liquid. This can include agents such as foam, vermiculite, perlite, gel, CO_2 granules, etc. The FG buoyancy study showed that in alkanes with a similar molecular length it is smaller than in alcohols, and for liquids with the same density it is larger.

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

The dependences for the buoyancy of dry and wet FG on the liquid density were obtained and described mathematically with R^2=0.9. A similar result was obtained from studies of the relationship between buoyancy and density from t_{fp}. This is partly due to the fact that the technical mixtures under consideration, unlike individual liquids, have disproportionate densities and wettability FG relative to the values for components.

The buoyancy of dry and wet FG does not differ as much as the water weight gained would suggest, because the same external open pores that previously contained the flammable liquid are now filled with water, and the difference in buoyancy is determined by the difference in densities of water and flammable liquid, and the changed flammable liquid contact area with the FG surface. In addition, methanol, ethanol, propanol-2, ethylene glycol and glycerin are infinitely soluble in water, so in the wet FG external pores, part of water is replaced by a flammable liquid. This effect further explains the buoyancy nonlinearity in alcohols and the difference with alkanes. Yes, the water density is less than the density of ethylene glycol and glycerin, so wetting with a lighter component should have slightly increased buoyancy, but this did not happen. The explanation may be the solution formation with water with a higher density than have components. Thus, this work presents the first analytical comparison of FG buoyancy in polar and nonpolar liquids, individual and technical mixtures.

The extinguishing completion with a FG layer is currently more investigated with a non-flammable gel, which is formed by the reaction of 10 % solutions of $CaCl_2$ and liquid glass. To hold the gel applied at a rate of 0.2 g/cm^2, the supporting layer of dry FG is 12 cm [3]; $CaCl_2$ also has an inhibitory effect on the flame. FG immersion by the gel increases the cooled layer thickness of the hot liquid, but hardly changes the heat balance inside the “liquid + FG” layer. That is, there is an effective cooling depth that determines the lowest FG flow rate – 4–6 cm (2–3 cm of the submerged part) for extinguishing only by cooling liquids with large t_{fp}.

It is possible to supply sprayed water or an inhibitor solution to the flame, then in addition to inhibition, cooling of the flame, the FG surface, and the liquid after FG deeper immersion will be involved. It is possible to coat the FG layer with a layer of flame retardant, substances that melt or swell under the flame influence. It is possible to complete the extinguishing with other standard means: medium-multiplicity foams, fire-extinguishing aerosol, general and special-purpose powders, non-flammable gases. Thus, the FG base layer formation on a burning liquid creates sufficient conditions for the extinguishing reliable completion by many methods, most of which do not contaminate the liquid.

At the study second stage, in order to clarify the normalized indicators of the FG use as a extinguishing base layer for liquids, the fire extinguishing mechanism and the modulating indicator of the process as a whole were established. It established that the FG layer has a primary effect in the liquid surface cooling form, which reduces the vapor pressure, its concentration, and the required evaporation retardation coefficient. At the same time, FG isolates the evaporation process by reducing the free surface area and retards the vapor diffusion into the combustion zone. The FG effectiveness is hindered by it wettability by flammable liquid, which increases the evaporation area, i.e. it does not decrease equally with the liquid mirror area occupied by FG particles. In addition, the wettability is not the same for different liquids. It was also previously observed [30] that technical aqueous solutions of methanol and ethanol burn out faster than pure liquids, which implies more difficult extinguishing conditions. In contrast, the fire-extinguishing layer FG for such solutions is reduced [4]. We assume that water-

containing clusters decompose more intensively at t_{bp} and under the flame heat flux influence than clusters of pure alcohol.

Thus, the work investigated the correlations with the dry FG fire-extinguishing layer of such indicators as molar mass, length of the molecular or cluster skeleton, combustion reaction stoichiometric coefficient, burning mass rate from the free surface, density, flash point, boiling point, and autoignition. It turned out that all these parameters work only for some liquids, because each of them does not take into account some factor from the complex that determines the formation of the extinguishing FG layer value. The solution to this problem in this work was to take into account the cluster supramolecular structure of the substance, with the correction that the primary cooling effect for different liquids constitutes a temperature range different fraction of they existence, therefore, a different reduction in saturated vapor pressure is achieved. A smaller effect is observed for low-boiling liquids, therefore it is assumed that their surface has a substance monomolecular state, for other liquids dimeric structures are assumed, for high-boiling liquids – up to heptameric, which corresponds to the cold alcohols spectrometry [33]. This approach for the first time allowed us to obtain mathematical relationships for the dry FG extinguishing layer depending on the expected clusters predominant length in the liquid.

The study results are limited to the homologous classes of alkanes and alcohols, therefore, for other organic compounds classes, separate tests and approximations must be carried out. Moreover, the deviations obtained during the description of physicochemical and fire-extinguishing properties of studied homologous series indicate the need to improve the experimental processing methodology. The problem with this and other approaches to modulating the FG extinguishing layer is that the extinguishing process by the supplying FG depends on the evaporation process (at different parts of the $t_{mp} – t_{bp}$ range), the FG wettability by the combustible liquid, the vapor diffusion rate through the FG layer, the LFL in the air, the combustion heat, cluster structures in the flame, and have different oxygen requirements for the combustion process. Given such an influencing factors number, it is difficult to achieve greater accuracy in predicting the dry FG extinguishing layer without developing a complex dependence. But the developed approach is sufficient to predict the conditions of the significantly weakened combustion above the FG, which can be extinguished by the vast majority of fire extinguishing means of volumetric or surface action.

Regarding the supramolecular structure consideration as a liquids extinguishing modulating indicator, a clear calculation principle has not yet been developed for determining the equivalent cluster length when describing a certain substance state, including for the liquid actual temperature. $t_{mp} – t_{bp}$ The simplest way is to take into account the residual portion of the temperature range "$t_{bp} – t_{mp}$ (or t_{tr})" after the fire extinguishing agent cooling effect on the surface has been triggered. But, most likely, this part will have to be taken into account in the certain function form, for example, a cube root, as a typical description of non-azeotropic mixtures.

For the studied options for extinguishing polar and non-polar liquids with dry or wet FG and under the condition of the additional coating with the inorganic gel, there are limitations to the method application. Effective extinguishing of alkanes with a dry or wet FG layer up to 8 cm is achieved only for flammable liquids with t_{fp}>61 °C, for alcohols in the dry FG case – for liquids with t_{fp} >45 °C, in the wet FG case – t_{fp}>10 °C. The gel extinguishing is poorly effective for polar liquids due to their water solubility.

Thus, in the field of FG application for the polar and non-polar liquids fire extinguishing, there are still many unexplored combinations with other fire extinguishing

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

means, which can provide a reliable fire extinguishing effect, cost-effectiveness and environmental friendliness.

8. Conclusions

1. The buoyancy characteristics of dry and wet foam glass in polar and non-polar flammable liquids have been determined. With increasing liquid density, the foam glass buoyancy increases according to a general law close to linear, which is described by approximation formulas separately for dry and wet foam glass, but taking into account both polar and non-polar liquids. The dry foam glass buoyancy in alkanes varies from 0.36 for n-pentane to 0.58, and for wet foam glass from 0.29 to 0.49 (in pentane, wet foam glass can be considered non-floating). The largest deviations from the linear law are observed for alkanes technical mixtures. The dry foam glass buoyancy in alcohols varies from 0.46 to 0.76, and for wet foam glass from 0.44 to 0.74 (the dependence is nonlinear due to the different alcohols water solubility). A relationship between buoyancy and the hydrocarbons flash point has been established, but the dependencies turned out to be individual for n-alkanes, n-alcohols, and glycols, which is described mathematically. A linear relationship between flash points and the liquids density has also been established. The obtained data allow us to predict the foam glass base layer for the binary fire extinguishing.

2. Correlations with the dry FG fire-extinguishing layer of molar mass, length of the molecular or cluster skeleton, combustion reaction stoichiometric coefficient, burning mass rate from the free surface, density, flash points, boiling points, and autoignition were found. The predicting possibility the extinguishing layer of the dry foam glass based on the chemical structure of the molecular and supramolecular states of flammable liquids has been established. An equation for the dry foam glass extinguishing layer depending on the expected clusters length in the liquid, as well as a similar dependence for the flash point, was obtained. Effective extinguishing with dry or wet foam glass of alkanes with a layer of up to 8 cm is achieved only for flammable liquids with t_{fp} >61 °C, for alcohols for the dry FG case – with t_{fp} >45 °C, for the wet FG – t_{fp} >10 °C. It is recommended to extinguish hydrocarbons with t_{fp}>28 °C with a base layer of wet foam glass 6 cm of fraction 1.0–1.5 cm, which is sufficient to stop the burning of most of such hydrocarbons or requires extinguishing completion with an inorganic gel with an application rate of 0.2 g/cm^2; for hydrocarbons with t_{fp} <28 °C, the wet foam glass base layer is 12 cm, which is sufficient to stop the burning or requires the gel supply with an application rate of 0.2 g/cm^2 for some substances.

References

1. Trehubov, D. H., Dadashov, I. F., Minska, N. V., Hapon, Yu. K., Chyrkina-Kharlamova, M. A. (2024). Fizyko-khimichni osnovy rozvytku ta hasinnya pozhezh horyuchykh ridyn. Kh.: NUTSZ Ukrayiny, 216. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/ 123456789/19111

2. DSTU B V.2.6-183:2011. (2012). Rezervuary vertykal′ni tsylindrychni stalevi dlya nafty ta naftoproduktiv: Zahal′ni tekhnichni umovy. [Chynnyy vid 2012-10-01]. Kyyiv: Minrehion Ukrayiny. Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/rezervuari_vertikalni_cilindrich-3-476789.pdf

3. Dadashov, I. F., Tregubov, D. G., Senchihin, Yu. N., Kireev, A. A. (2018). Improvements of extinguishing of oil products. Scientific Bulletin of Construction, 94(4), 238–249. doi: 10.29295/2311–7257–2018–94–4–238–249

4. Dadashov, I. F., Kiryeyev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021).

Hasinnya horyuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoryuyuchymy systemamy. Kh.: NUTSZU, 240. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033

5. Tregubov, D., Dadashov, I., Nuianzin, V., Khrystych, O., Minska, N. (2023). Relationship Between Properties of Floating Systems and Flammable Liquids in the Stopping Their Burning Technology. Key Engineering Materials, 954, 145–155. doi: 10.4028/p-krzrd9

6. Loboichenko, V., Strelets, V., Gurbanova, M., Morozov, A., Kovalov, P., Shevchenko, R., Kovalova, T., Ponomarenko, R. (2019). Review of Environmental Characteristics of Fire Extinguishing Substances of Different Composition used for Fires Extinguishing of Various Classes. Journal of Engineering and Applied Sciences, 14, 5925–5941. doi: 10.36478/jeasci.2019.5925.5941

7. Zhi, H., Bao, Y., Wang, L., Mi, Y. (2020). Extinguishing performance of alcohol-resistant firefighting foams on polar flammable liquid fires. Journal of Fire Sciences, 38(1), 53–74. doi:10.1177/0734904119893732

8. Zarzyka, I., Majda, D. (2017). Thermogravimetric and qualitative analysis of thermal decomposition characteristics of polyurethane foams based on polyols with carbamide or oxamide, borate. Polymer International, 66(11), 1675–1683. doi: 10.1002/pi.5

9. Balanyuk, V., Kozyar, N., Kopystynskyi, Y., Kravchenko, A. (2018). Extinguishing fires of alcohols and their mixtures. Fire Safety, (33), 5–9. doi: 10.32447/20786662.33.2018.01

10. Balanyuk, V., Kozyar, N., Garasyumyk, O. (2016). Study of fire–extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technical science, 3/10(81), 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399

11. Balanyuk, V., Kravchenko, A., Harasymyuk, O. (2021). Reducing the intensity of thermal radiation at the sublayer extinguishing of alcohols by ecologically acceptable aerosols. Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science, 1/10(109), 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225216

12. Korolov, R., Kovalyshyn, V., Shtajn, B. (2017). Analysis of methods for extinguishing fires in reservoirs with oil products by a combined method. ScienceRise, 6(35), 41–50. doi: 10.15587/2313-8416.2017.104613

13. Balanyuk, V., Myroshkin, V., Kopystinsky, Y., Hirskyi, O., Gerasimiuk, O. (2022). Comparison of fire extinguishing substances for extinguishing fires of flammable liquids. Fire Safety, 41, 12–19. doi: 10.32447/20786662.41.2022.02

14. Tianwei, Zh., Cunwei, Zh., Hao, L., Zhiyue, H. (2020). Experimental investigation of novel dry liquids with aqueous potassium Solution@Nano-SiO_2 for the suppression of liquid fuel fires: preparation, application, and stability. Fire Safety Journal, 115, 103144. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103144

15. Shi, B., Zhou, F. (2016). Fire extinguishment behaviors of liquid fuel using liquid nitrogen jet. Process Safety Progress, 35(4), 407–413. doi: 10.1002/prs.11815

16. Khrystych, V. V., Malyarov, M. V., Bondarenko, S. M. (2016). Suchasni sposoby pidvyshchennya efektyvnosti hasinnya pozhezhi rozporoshenoyu vodoyu. Problemy pozharnoy bezopasnosty, 40. 201–205. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/2198

17. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. Eastern-

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

European J. of Ent. Techn, 2(10–92), 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

18. Karvatska, M., Lavreniuk, O., Mykhalichko, B. (2023). Current status and directions for the improvement of aqueous fire-extinguishing agents. Scien. Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(15), 92–100. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100

19. Abdulrahman, S., Chetehouna, K., Cablé, A., Skreiberg, O., Kadoche, M. (2021). A review on fire suppression by fire sprinklers. Review on fire suppression by fire sprinklers. Journal of Fire Sciences, 39(6), 512–551. doi: 10.1177/07349041211013698

20. Lu, J., Liang, P., Chen, B., Wu, C., Zhou, T. (2019). Investigation of the Fire-Extinguishing Performance of Water Mist with Various Additives on Typical Pool Fires. Combustion S. and Techn, 192(4), 592–609. doi: 10.1080/00102202. 2019.1584798

21. Abramov, Y., Kolomiiets, V., Sobyna, V. (2023). Models of fire extinguishing when flammable liquid combustion. Municipal economy of cities, 4, 194–198. doi: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-194-198

22. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovaliov, 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

23. 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

24. Makarenko, V., Kireev, A., Tregubov, D., Chirkina, M. (2021). Investigation of fire extinguishing properties of binary layers of lightweight porous materials. Problems of Emergency Situations, 33, 235–244. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

25. Jelagin, G., Kutsenко, M., Alекseev, A., Nuianzin, A., Nesen, I. (2022). Extinguishing media for spilled flammable liquids. The scientific heritage, 84(1), 15–25. doi: 10.24412/9215-0365-2022-84-1-15-25

26. Tregubov, D., Trefilova L., Slepuzhnikov, E., Sokolov, D., Trehubova, F. (2023). Correlation of properties in hydrocarbons homologous series. Problems of Emergency Situations, 2(38), 96–118. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-7

27. Tregubov, D., Trefilova L., Minska N., Hapon Yu., Sokolov, D. (2024). Nonlinearities correlation of n-alkanes and n-alcohols physicochemical properties. Problems of Emergency Situations, 1(39),4–24. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-1

28. Tregubov, D., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M., Maiboroda, A. (2023). Cluster Mechanism of the Explosive Processes Initiation in the Matter. Key Engineering Materials, 952, 131–142. doi: 10.4028/p-lZz2Hq

29. Glassman, I., Yetter, R. A., Glumac, N. G. (2014). Combustion. London: Elsevier. doi: 10.1016/C2011-0-05402-9

30. Tregubov, D., Tarakhno, O., Sokolov, D., Trehubova, F. (2021). The identification of hydrocarbons cluster structure by melting point. Problems of Emergency Situations, 34, 94–109. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-7

31. PubChem. Compound summary. Available at: https://pubchem. ncbi.nlm.nih.gov/

32. Tregubov, D., Tarakhno, O., Deineka, V., Trehubova, F. (2022). Oscillation and Stepwise of Hydrocarbon Melting Temperatures as a Marker of their Cluster Structure. Solid State Phenomena, 334, 124–130. doi: 10.4028/p-3751s3

33. Doroshenko, I. Yu. (2017). Spectroscopic study of cluster structure of n-hexanol trapped in an argon matrix. Low Temperature Physics, 3(6), 919–926. doi: 10.1063/1.4985983

***Д. Г. Трегубов*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф.*
***О. О. Кірєєв*[1]**, *д.т.н., професор, проф. каф.*
***К. Т. Казімов*[2]**, *к.т.н., заст. нач. ННР*
***Л. М. Трефілова*[1]**, *д.т.н., професор, проф. каф.*
***Є. Д. Слепужніков*[1]**, *к.т.н., доцент, нач. каф.*
***С. А. Вавренюк*[1]**, *д.н. з держ. упр., проф. каф.*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*
[2]*Академія Міністерства надзвичайних ситуацій, Баку, Азербайджанська Республіка*

НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ РІДИН НА ОСНОВІ БАЗОВОГО ШАРУ ПІНОСКЛА

Встановлено моделюючий параметр горючої рідини для прогнозування вогнегасного шару піноскла як базового засобу для забезпечення надійного пожежогасіння рідин у комплексі з іншими вогнегасними засобами. Досліджено особливості формування та показників плавучості сухого та вологого піноскла у полярних та неполярних рідинах (алканах та спиртах). Показано зростання плавучості піноскла зі збільшенням густини рідини. Описано плавучість піноскла у полярних і неполярних рідинах залежно від густини рідини апроксимаційною лінійною залежністю окремо для сухого і вологого піноскла. Пояснено відхилення від лінійного закону різною змочуваністю піноскла, водорозчинністю деяких спиртів, особливостями сумішей рідин. Встановлено зв'язок плавучості з температурою спалаху, який спостерігається окремо для н-алканів, н-спиртів та гліколів, що описано математично. Розроблено формулу для опису взаємозв'язку температур спалаху з густиною рідин. Досліджено кореляції з вогнегасним шаром сухого піноскла молярної маси, довжини каркасу молекули або кластеру, стехіометричного коефіцієнту реакції горіння, швидкості вигоряння з вільної поверхні, густини, температур спалаху, кипіння, самоспалахування. Встановлено можливість прогнозування вогнегасного шару сухого піноскла на підставі опису кластерів горючих рідин. Отримано математичні залежності для вогнегасного шару сухого піноскла залежно від довжини очікуваних кластерів у рідині та аналогічну залежність для температур спалаху. Визначено умови ефективного гасіння спиртів та алканів сухим піносклом. Рекомендовано різні режими гасіння вуглеводнів з температурами спалаху $t_{сп}$ <28 °С та $t_{сп}$ >28 °С на основі базового шару вологого піноскла 6 см фракції 1,0–1,5 см з можливістю завершення гасіння за необхідності неорганічним гелем шляхом розпилення компонентів з витратою нанесення 0,2 г/см^2.

Ключові слова: пожежогасіння, горюча рідина, кластер, піноскло, плавучість, ізоляція, охолодження, гель, витрата

Література

1. Трегубов Д., Дадашов І., Мінська Н., Гапон Ю. Чиркіна-Харламова М. Фізико-хімічні основи розвитку та гасіння пожеж горючих рідин. Харків: НУЦЗ України, 2024. 216 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19111

2. ДСТУ Б В.2.6-183:2011. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів: Загальні технічні умови. [Чинний від 2012-10-01]. Київ: Мінрегіон України, 2012. 99 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/rezervuari_vertikalni_cilindrich-3-476789.pdf

3. Дадашов І. Ф., Трегубов Д. Г., Кірєєв О. О., Сенчихін Ю. М. Напрямки вдосконалення гасіння пожеж нафтопродуктів. Науковий вісник будівництва. 2018. № 94(4). С. 238–249. doi: 10.29295/2311–7257–2018–94–4–238–249

4. Дадашов І., Кірєєв О. Трегубов Д., Тарахно О. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами. Харків: НУЦЗ України, 2021. 240 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14033

5. Tregubov D., Dadashov I., Nuianzin V., Khrystych O., Minska N. Relationship Between Properties of Floating Systems and Flammable Liquids in the Stopping Their Burning Technology. Key Engineering Materials. 2023. № 954. P. 145–155. doi: 10.4028/p-krzrd9

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

6. Loboichenko V., Strelets V., Gurbanova M., Morozov A., Kovalov P., Shevchenko R., Kovalova T., Ponomarenko R. Review of Environmental Characteristics of Fire Extinguishing Substances of Different Composition used for Fires Extinguishing of Various Classes. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019. Vol. 14. P.5925–5941. doi: 10.36478/jeasci.2019.5925.5941

7. Zhi H., Bao Y., Wang L., Mi Y. Extinguishing performance of alcohol-resistant firefighting foams on polar flammable liquid fires. Journal of Fire Sciences. 2020. № 38(1). P. 53–74. doi:10.1177/0734904119893732

8. Zarzyka I., Majda D. Thermogravimetric and qualitative analysis of thermal decomposition characteristics of polyurethane foams based on polyols with carbamide or oxamide, borate. Polymer International. 2017. Vol. 66(11). P. 1675–1683. doi: 10.1002/pi.5

9. Баланюк В., Козяр Н., Копистинский Ю., Кравченко А. Проблеми гасіння пожеж спиртів та їх сумішей. Пожежна безпека. 2018. № 33. С. 5–9. doi: 10.32447/20786662.33.2018.01

10. Balanyuk V., Kozyar N., Garasyumyk O. Study of fire–extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technical science. 2016. № 3(81). P. 4–11. doi: 10.15587/1729-4061.2016.72399

11. Balanyuk V., Kravchenko A., Harasymyuk O. Reducing the intensity of thermal radiation at the sublayer extinguishing of alcohols by ecologically acceptable aerosols. Eastern-european journal of enterprise technologies. Technical science. 2021. Vol. 1/10(109). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225216

12. Korolov R., Kovalyshyn V., Shtajn B. Analysis of methods for extinguishing fires in reservoirs with oil products by a combined method. ScienceRise. 2017. № 6(35). P. 41–50. doi: 10.15587/2313-8416.2017.104613

13. Баланюк В. М., Мірошкін В. С., Копистинський Ю. О., Гірський О. І., Герасим'юк О. І. Порівняння вогнегасних речовин для гасіння пожеж легкозаймистих та горючих рідин. Пожежна безпека. 2022. № 41. С. 12–19. doi: 10.32447/20786662.41.2022.02

14. Tianwei Zh., Cunwei Zh., Hao L., Zhiyue H. Experimental investigation of novel dry liquids with aqueous potassium Solution@Nano-SiO_2 for the suppression of liquid fuel fires: preparation, application, and stability. Fire Safety Journal. 2020. Vol. 115. P. 103144. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103144

15. Shi B., Zhou F. Fire extinguishment behaviors of liquid fuel using liquid nitrogen jet. Process Safety Progress. 2016. № 35(4). P. 407–413. doi: 10.1002/prs.11815

16. Христич В. В., Маляров М. В., Бондаренко С. М. 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

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

18. Карвацька М., Лавренюк О., Михалічко Б. Сучасний стан і напрями вдосконалення водних вогнегасних речовин. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. № 1(15). P. 92–100. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15).92-100

19. Abdulrahman S., Chetehouna Kh., Cable A., Skreiberg O., Kadoche M. Re-

view on fire suppression by fire sprinklers. Journal of Fire Sciences. 2021. № 39(6). P. 512–551. doi: 10.1177/07349041211013698

20. Lu J., Liang P., Chen B., Wu C., Zhou T. Investigation of the Fire-Extinguishing Performance of Water Mist with Various Additives on Typical Pool Fires. Combustion Science and Techn. 2019. № 192(4). P. 592–609. doi: 10.1080/00102202.2019.1584798

21. Абрамов Ю., Коломієць В., Собіна В. Моделі пожежегасіння при горінні легкозаймистих рідин. Комунальне господарство міст. 2023. № 4(178). С. 194–198. doi: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-194-198

22. Chernukha A., Teslenko A., Kovaliov P., Bezuglov O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. Materials Science Forum. 2020. № 1006. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70

23. 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. № 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

24. Макаренко В. С., Кірєєв О. О., Трегубов Д. Г., Чиркіна М. А. Дослідження вогнегасних властивостей бінарних шарів легких пористих матеріалів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 33. С. 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

25. Jelagin G., Kutsenko M., Alekseev A., Nuianzin A. Extinguishing media for spilled flammable liquids. The scientific heritage. 2022. № 84(1). P. 15–25. doi: 10.24412/9215-0365-2022-84-1-15-25

26. Трегубов Д., Трефілова Л., Слепужніков Є., Соколов Д., Трегубова Ф. Співвідношення властивостей у гомологічних рядах вуглеводнів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 2(38). С. 96–118. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-7

27. Tregubov D., Trefilova L., Minska N., Hapon Yu., Sokolov D. Nonlinearities correlation of n-alkanes and n-alcohols physicochemical properties. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2024. № 1(39). С. 4–24. doi: 10.52363/2524-0226-2024-39-1

28. Tregubov D., Slepuzhnikov E., Chyrkina M., Maiboroda A. Cluster Mechanism of the Explosive Processes Initiation in the Matter. Key Engineering Materials. 2023. Vol. 952. P. 131–142. doi: 10.4028/p-lZz2Hq

29. Glassman I., Yetter R. A., Glumac N. G. Combustion. London: Elsevier, 2014. 757 p. doi:10.1016/C2011-0-05402-9

30. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Соколов Д. Л., Трегубова Ф. Д. Ідентифікація кластерної будови вуглеводнів за температурами плавлення. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 34. С. 94–109. doi: 10.52363/2524-0226-2021-34-7

31. PubChem. Compound summary. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/

32. Tregubov D., Tarakhno O., Deineka V., Trehubova F. Oscillation and Stepwise of Hydrocarbon Melting Temperatures as a Marker of their Cluster Structure. Solid State Phenomena. 2022. Vol. 334. P. 124–130. doi: 10.4028/p-3751s3

33. Doroshenko I. Yu. Spectroscopic study of cluster structure of n-hexanol trapped in an argon matrix. Low Temperature Physics. 2017. № 3(6). P. 919–926. doi: 10.1063/1.4985983

Надійшла до редколегії: 10.10.2024
Прийнята до друку: 16.11.2024

© D. Tregubov, O. Kireev, K. Kyazimov, L. Trefilova and others

УДК 351.861

О. О. Ковальов*[1]*, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4974-5201)*
Д. М. Ядченко*[2]*, *нач. упр. (ORCID 0000-0002-6451-7338)*
А. С. Мельниченко*[1]*, *PhD, ст. викл. (ORCID 0000-0002-7229-6926)*
В. О. Собина*[1]*, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)*
Д. В. Тарадуда*[1]*, *заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9167-0058)*
О. Г. Панченко*[3]*, *ст. викл. (ORCID 0009-0009-7727-3035)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*
[2]*Управління організації роботи та використання безпілотних систем та робототехніки ДСНС, Київ, Україна*
[3]*Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна*

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЙМОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ТОЧКОВОЇ ЦІЛІ ОПЕРАТОРОМ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У роботі розроблено математичну модель ймовірності виявлення точкової цілі оператором оптико-електронного засобу, встановленого на безпілотному літальному апараті, з використанням критерію Джонсона та біноміального закону повторних випробувань. Метою дослідження є оцінка ймовірності виявлення цілі за допомогою сенсорної системи в умовах різноманітних зовнішніх факторів. В рамках дослідження розглянуто вплив різних умов, таких як освітлення, погодні умови та характеристики сенсорних систем на ефективність виявлення цілі. У ході дослідження було побудовано математичну модель, яка дозволяє визначити ймовірність успішного виявлення цілі за допомогою оптико-електронних засобів. Модель передбачає використання біноміального закону для врахування кількості спроб виявлення та застосування критерію Джонсона для підвищення точності. Цей підхід дозволяє враховувати фактори, що знижують ефективність виявлення, а також дозволяє оптимізувати параметри роботи сенсора залежно від умов експлуатації. Результати дослідження показали, що за оптимальних параметрів сенсора й умов навколишнього середовища ймовірність успішного виявлення можна значно підвищити. Моделювання різних сценаріїв дозволяє отримати точнішу оцінку ймовірності та знизити ймовірність помилок. Ці дані є важливими для вдосконалення технологій виявлення, дозволяючи більш ефективно налаштовувати сенсори, що покращує точність і надійність системи. Отримані результати мають важливе практичне значення для оптимізації використання оптико-електронних систем у складі безпілотних літальних апаратів. Ця модель дає можливість мінімізувати ризики помилкових спрацьовувань та підвищити точність виявлення цілей в реальних умовах. Така розробка є корисною не тільки для оборонної сфери, але й для цивільних застосувань, таких як моніторинг навколишнього середовища та безпека.

Ключові слова: математична модель, оптико-електронні системи, точкова ціль, оператор корисного навантаження

1. Вступ

У сучасному світі значно зросла кількість надзвичайних ситуацій природного і техногенного характеру, які потребують швидкої та ефективної реакції для зменшення шкоди та порятунку життя людей. Такі ситуації часто виникають у результаті природних катастроф, таких як землетруси, повені, лісові пожежі, або техногенних аварій, таких як вибухи, розливи хімічних речовин чи катастрофи на транспорті. Пошуково-рятувальні операції є важливою складовою зниження наслідків цих подій, однак вони часто супроводжуються високими ризиками для рятувальників та великими витратами часу та ресурсів. В таких умовах використання новітніх технологій є необхідним для забезпечення швидкості та ефективності рятувальних заходів. Безпілотні літальні апарати (БпЛА) стали важливим інструментом у роботі аварійно-рятувальних підрозділів, оскільки вони здатні оперативно надавати інформацію про масштаби катастрофи, здійснювати моніторинг місцевості та проводити пошукові операції без ризику для життя особового складу

рятувальників.

Завдяки своїм характеристикам БпЛА мають низку переваг у порівнянні з традиційними методами. Вони можуть здійснювати політ у важкодоступних районах, де використання наземних чи повітряних засобів є проблематичним через небезпеку чи технічні обмеження. Безпілотники з обладнанням, таким як відео- та інфрачервоні камери, що є частиною оптико-електронних систем (ОЕС), можуть здійснювати детальне спостереження та допомагати у виявленні зниклих осіб чи оцінці шкоди. Однак для забезпечення максимального ефекту від застосування БпЛА в таких операціях, необхідно мати чітке розуміння того, як оптимально застосувати ці системи в залежності від конкретних умов.

Для цього важливо розробляти математичні моделі, що дозволяють точніше оцінити ймовірність успішного виявлення та розпізнавання об’єктів, зокрема людей, у заданих умовах. Створення таких моделей дозволить врахувати різноманітні фактори, що впливають на ефективність пошуку, такі як якість зображення, погодні умови, тип місцевості та характеристики оптико-електронної системи. Окрім того, на результативність пошукової операції впливає досвід та кваліфікація оператора, тому математичні моделі мають враховувати й цей аспект для більш точного прогнозування.

Розробка таких моделей дозволить не лише підвищити ефективність пошуково-рятувальних робіт, але й значно зменшити час, що витрачається на пошук, а також підвищити безпеку операцій. Це, в свою чергу, дозволить знизити ризик для життя рятувальників і зменшити кількість помилкових спрацьовувань систем. Крім того, точніші прогнози можуть допомогти оптимізувати використання ресурсів і краще планувати маршрути польотів БпЛА, що зробить пошуково-рятувальні операції більш економічно ефективними.

Таким чином, проблема розробки математичних моделей для розрахунку ймовірностей виявлення та розпізнавання об’єктів за допомогою БпЛА є надзвичайно актуальною, оскільки вона дозволяє значно підвищити ефективність пошуково-рятувальних операцій. Технічне забезпечення таких робіт повинно відповідати високим вимогам, адже від цього безпосередньо залежить успіх рятувальних місій. Розробка таких моделей є важливою складовою цієї наукової проблеми і відкриває нові можливості для покращення ефективності та безпеки в умовах катастроф.

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

Застосування безпілотних літальних апаратів для виявлення точкових цілей у пошуково-рятувальних операціях набуло значного поширення завдяки їх мобільності, здатності працювати в важкодоступних районах та мінімізації ризиків для людей. Проте, аналіз наукових досліджень показує, що існує низка суттєвих обмежень, які перешкоджають максимальному використанню потенціалу цих систем.

Дослідження, присвячені технічним характеристикам безпілотних літальних апаратів, зосереджуються переважно на оцінці їхньої висоти польоту, швидкості, тривалості роботи та вантажопідйомності. Хоча ці параметри є критично важливими для ефективного планування пошукових операцій, вони не враховують впливу змінних зовнішніх умов. Наприклад, погодні фактори, такі як вітер, опади або низька видимість, можуть значно впливати на точність виявлення об’єктів. Відсутність такого аналізу знижує практичну цінність представлених у дослідженнях моделей і обмежує їх застосування в реальних умовах.

Ще одним важливим аспектом є використання оптико-електронних систем у

 © О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

пошуково-рятувальних операціях. У науковій літературі досить детально розглянуто технічні параметри таких систем, зокрема розрізнювальну здатність сенсорів, фокусну відстань, кути поля зору та формат зображення. Однак ці дослідження здебільшого орієнтовані на лабораторні умови або ідеальні сценарії. Недостатньо враховується, як характеристики систем змінюються під впливом навколишнього середовища. Наприклад, туман, дощ або нерівна місцевість можуть суттєво впливати на якість отриманих зображень, ускладнюючи процес виявлення цілі. Відсутність адаптивних моделей, які враховують ці фактори, знижує ефективність оптико-електронних систем у реальних умовах пошуку.

Окремий напрямок досліджень присвячено ролі кваліфікації оператора у виявленні об’єктів. У роботах розглядаються різні аспекти впливу підготовки оператора на успішність операцій, зокрема здатність до швидкого аналізу отриманих зображень та прийняття рішень. Однак більшість досліджень базуються на аналізі ідеальних умов, коли оператор працює в комфортному середовищі, має доступ до якісної інформації та достатньо часу для прийняття рішення. У реальних умовах оператори стикаються зі стресовими ситуаціями, великими обсягами інформації та недостатнім часом для її обробки. Ці фактори значно впливають на результативність виявлення цілей, але вони часто ігноруються в існуючих моделях.

Математичне моделювання процесу виявлення цілей за допомогою безпілотних літальних апаратів є ще однією важливою темою досліджень. Наявні моделі зазвичай зосереджуються на аналізі окремих аспектів, таких як розміри об’єкта, висота польоту або розрізнювальна здатність сенсора. Проте ці моделі здебільшого базуються на статичних умовах і не враховують динамічні зміни, характерні для реальних операцій. Наприклад, рухомі об’єкти, зміна погодних умов або необхідність швидкої зміни маршруту польоту літального апарата є факторами, які суттєво впливають на точність і швидкість виявлення. Відсутність у моделях врахування таких змін обмежує їх застосування в реальних пошуково-рятувальних операціях.

Окрім того, у більшості досліджень відсутній комплексний підхід до моделювання. Технічні характеристики систем, умови місцевості, погодні фактори та кваліфікація оператора здебільшого аналізуються окремо, що не дозволяє оцінити їх взаємний вплив на ефективність пошуку. Такий розрізнений підхід унеможливлює створення цілісної системи прогнозування результативності пошуково-рятувальних операцій.

Виявлені обмеження в існуючих дослідженнях свідчать про те, що невирішеною частиною проблеми є розробка математичної моделі, яка б враховувала всі критично важливі фактори, включаючи технічні характеристики оптико-електронних систем, параметри польоту, погодні умови, тип місцевості та кваліфікацію оператора. Така модель повинна забезпечувати прогнозування ймовірності виявлення та розпізнавання цілей у реальних умовах, що значно підвищить ефективність пошуково-рятувальних операцій.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка математичної моделі ймовірності виявлення точкової цілі оператором корисного навантаження оптико-електронної системи, яка встановлена на безпілотному літальному апараті. Модель повинна враховувати вплив змінних зовнішніх умов, характеристик технічного обладнання та рівня підготовки оператора для підвищення точності та ефективності пошуково-рятувальних операцій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити математичну модель ймовірності виявлення цілі оператором оптико-електронної системи безпілотного літального апарата, яка буде враховувати:

- технічні характеристики оптико-електронної системи: фокусну відстань, кути поля зору, розрізнювальна здатність та розмір пікселя;
- вплив зовнішніх умов: погодні фактори (опади, туман, швидкість вітру) та особливості рельєфу місцевості, на ймовірність виявлення цілі;
- параметрами польоту: висота та маршрут літального апарата;

2. Провести чисельне моделювання для оцінки ефективності розробленої математичної моделі в умовах реальних пошуково-рятувальних операцій.

Вирішення цих завдань забезпечить реалізацію поставленої мети та дозволить підвищити ефективність і надійність пошуково-рятувальних операцій завдяки вдосконаленню математичного підходу до оцінки ймовірності виявлення об’єктів.

4. Матеріали та методи досліджень

Об’єктом дослідження є процес виявлення точкових цілей у пошуково-рятувальних операціях із застосуванням оптико-електронних систем, які встановлюються на безпілотних літальних апаратах. Предметом дослідження виступають математичні залежності між технічними характеристиками оптико-електронних систем, умовами місцевості, зовнішніми чинниками та рівнем підготовки оператора, які впливають на ймовірність виявлення цілей.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що розробка математичної моделі, яка враховує взаємодію технічних характеристик сенсорів, параметрів польоту, зовнішніх умов та рівня підготовки оператора, дозволить підвищити точність і ефективність виявлення цілей у реальних умовах пошуково-рятувальних операцій.

Дослідження виконувалися на основі математичного аналізу, чисельного моделювання та експериментальної перевірки. На першому етапі було розроблено математичну модель, яка описує залежності між технічними характеристиками оптико-електронних систем, такими як фокусна відстань, роздільна здатність і кути поля зору, та зовнішніми чинниками, зокрема погодними умовами і типом рельєфу. Модель базується на використанні біноміального закону повторних випробувань та критерію Джонсона для підвищення точності оцінки ймовірності виявлення цілі.

Наступним кроком було проведення чисельного моделювання, під час якого аналізували різні сценарії пошукових операцій з урахуванням змінних факторів, таких як висота польоту, маршрут безпілотного літального апарата, погодні умови та кваліфікація оператора. Це дозволило оцінити ефективність моделі у змінних умовах та виявити найбільш впливові параметри.

На завершальному етапі здійснювалися польові випробування, під час яких використовували безпілотні літальні апарати DJI Matrice 3000, обладнані оптико-електронними системами з інфрачервоними та відеокамерами. Отримані під час експериментів дані про точність і швидкість виявлення порівнювалися з результатами моделювання для оцінки адекватності розробленої моделі. У процесі випробувань також використовувалися метеорологічні датчики для фіксації умов середовища, зокрема температури, вологості та швидкості вітру.

Для реалізації досліджень було залучено програмне забезпечення MATLAB, яке використовувалося для математичних розрахунків і моделювання, а також симуляційна платформа X-Plane, що дозволила моделювати польоти безпілотних

літальних апаратів у різних умовах. Інформація, отримана під час моделювання і експериментів, дала змогу валідувати розроблену математичну модель та сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації пошуково-рятувальних операцій залежно від умов експлуатації.

5. Розробка математичної моделі ймовірності виявлення цілі оператором оптико-електронної системи

Розв'язання поставленої мети виконаємо стосовно таких умов. Розрахунок безпілотного літального апарата здійснює пошук точкового наземного об'єкта площею Sm в заданому районі пошуку площею Sp за допомогою ОЕС видимого діапазону, встановленої на БпЛА. ОЕС включає в себе відеокамеру та монітор. Монітор знаходиться на наземному пункті управління безпілотного літального апарата. Формат зображення монітора повністю відповідає формату зображення приймача випромінювання. Відеокамера встановлена безпосередньо на літальному апараті під кутом візування α. Технічні характеристики камери з встановленим об'єктивом: вертикальний кут поля зору $\alpha_в$; горизонтальний кут поля зору $\alpha_г$; фокусна відстань об'єктива f; швидкість зйомки τ (для фотозйомки серійність зйомки, для відеозйомки частота кадру); лінійне розрізнення ОЕС на місцевості R; розмір пікселя матриці δ; розмір матриці приймача випромінювання за горизонталлю a та за вертикаллю b.

Проєкція поля зору відеокамери на контрольовану в процесі польоту БпЛА земну поверхню при куті візування 0° має форму прямокутника, а при куті візування, відмінному від 0°, – трапецію (рис. 1) з параметрами та площею, що визначаються наступними виразами:

$$l_1 = AB = \frac{2h_{пол}\,th\left(\frac{\alpha_г}{2}\right)}{\cos\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)}, \alpha + \frac{\alpha_в}{2} < 90^\circ; \quad (1)$$

$$l_2 = DC = \frac{2h_{пол}\,tg\left(\frac{\alpha_г}{2}\right)}{\cos\left(\alpha - \frac{\alpha_в}{2}\right)}, \alpha - \frac{\alpha_в}{2} < -90^\circ; \quad (2)$$

$$l_3 = MK = h_{пол}\sqrt{\left(\frac{1}{\cos\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)}\right)^2 + \left(\frac{1}{\cos\left(\alpha - \frac{\alpha_в}{2}\right)}\right)^2 - \frac{2\cos\alpha_в}{\cos\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)\cos\left(\alpha - \frac{\alpha_в}{2}\right)}},$$

$$\alpha \pm \frac{\alpha_в}{2} < \pm 90^\circ; \quad (3)$$

$$l_4 = PG = \frac{l_2 - l_1}{2}; \quad (4)$$

$$S_{обз} = l_4 l_3; \tag{5}$$

де: l_1 – основа трапеції (сторона прямокутника), ближня відносно БпЛА; l_2 – основа трапеції (сторона прямокутника), дальня відносно БпЛА; l_3 – висота трапеції (прямокутника); l_4 – середня лінія трапеції; $S_{обз}$ – площа зони огляду ОЕС земної поверхні; $h_{пол}$ – висота польоту безпілотного літального апарата.

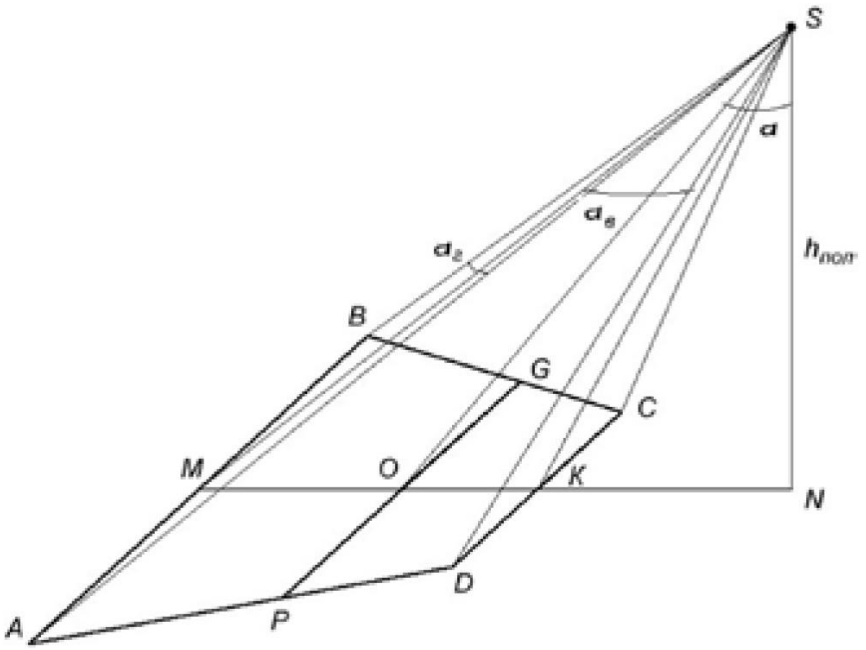


Рис. 1. Проекція поля зору відеокамери на земну поверхню

Розв’язання задачі розглянемо стосовно випадку, коли кількість БпЛА, залучених до пошуку, обмежена, район пошуку обширний, дані про місце та маршрут руху тих, хто зазнав лиха, відсутні. У таких умовах для детального огляду ділянок місцевості в межах району пошуку використовують прямолінійні взаємно паралельні маршрути – паралельне галсування. Маршрути прокладають таким чином, щоб краї поля зору ОЕС БпЛА двох сусідніх маршрутів при встановленій висоті польоту $h_{пол}$ літального апарата, як мінімум, стикалися. Це забезпечить 100%-ний огляд ОЕС БпЛА району пошуку. Отже, відстань між маршрутами повинна бути рівною l_1. Обліт району пошуку літальним апаратом здійснюється з крейсерською швидкістю $V_{кр}$.

Зв’язок між розмірами матриці приймача випромінювання та кутами поля зору ОЕС такий:

$$\alpha_г = \operatorname{arctg}\frac{a}{2f}; \tag{6}$$

$$\alpha_в = \operatorname{arctg}\frac{b}{2f}. \tag{7}$$

У процесі польоту БпЛА отримане за допомогою відеокамери відеозображення ділянки місцевості передається по радіоканалу на наземний пункт управління, де відображається на моніторі оператора цільового навантаження. Оператор у ході аналізу отриманої інформації виявляє ціль.

© О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

У системах відеореєстрації для визначення ймовірностей виявлення і розпізнавання об'єктів використовують критерій Джонсона. Його суть стосовно до розв'язуваної задачі полягає в тому, що існує відповідність між кількістю розв'язуваних періодів еквівалентної мішені, що вкладаються на мінімальному розмірі спостережуваного об'єкта пошуку, та рівнем його сприйняття. Як еквівалентну мішень взято штрихову мішень прямокутної форми, ширина якої дорівнює мінімальному розміру об'єкта пошуку, а довжина відповідає розміру, перпендикулярному мінімальному розміру. Цей критерій також застосовується для оптико-електронних систем з вихідним відеосигналом відеокамер, з тією відмінністю, що замість пар ліній штрихової мішені значення вказують у телевізійних лініях що, також називають елементами зображення – пікселями. Графічне вираження критерію Джонсона стосовно до розв'язуваної задачі виявлення і розпізнавання зображень об'єктів пошуку представлено на рис. 2 [1].

Використовуючи метод найменших квадратів і апроксимуючи криві ймовірностей виявлення і розпізнавання об'єктів від кількості елементів розрішення, займаних ними на відеоматеріалах, експоненціальними функціями, отримаємо аналітичні залежності:

$$P_{об} = 1 - e^{-0.2(N-1)^2}; \tag{8}$$

$$P_{рас} = 1 - e^{-0,015(N-1)^2}, \tag{9}$$

де $P_{об}$, $P_{роз}$ – ймовірності виявлення та розпізнавання і ідентифікації об'єктів; N – кількість елементів розрішення, займаних об'єктом пошуку на моніторі наземного пункту управління.

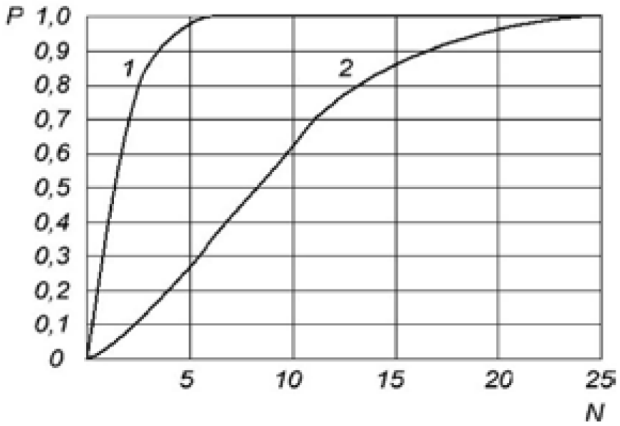


Рис. 2. Залежності ймовірностей виявлення (1) та розпізнавання (2) об'єктів пошуку від кількості елементів розрішення, займаних ними на моніторі

Залежність між розмірами об'єкта пошуку на місцевості та кількістю N визначається виразом [2].

$$N = \frac{l_m f}{R h_{пол}}, \tag{10}$$

де lm – лінійні розміри об'єкта пошуку за напрямком польоту БпЛА; $h_{пол}$ – встановлена висота польоту літального апарата; R – лінійне розрішення ОЕС на місцевості, пов'язане з розмірами δ співвідношенням виду

$$R = \frac{h_{пол}\delta}{f}. \tag{11}$$

При потраплянні об'єкта пошуку в поле зору ОЕС він з'явиться на екрані монітора наземного пункту управління, і оператор корисного навантаження виявить і розпізнає об'єкт пошуку з ймовірністю p, яка дорівнює ймовірності розпізнавання $P_{роз}$.

Район пошуку стосовно ОЕС БпЛА можна розглядати як серію відеокадрів n = n1·n2 – незалежних випробувань, що визначаються добутком кількості елементів розрішення n_1, що припадають на повний маршрут польоту БпЛА, і кількістю кадрів n_2, що припадають на елемент розрішення, що визначаються виразами (12), (13). Елемент розширення являє собою поле зору ОЕС на земну поверхню.

$$n = n_1 n_2; \tag{12}$$

$$n_1 = \left[\frac{l_{пол}}{l_3}\right]; \tag{13}$$

$$n_2 = \left[\frac{l_3}{V_{кр}}\right]\tau, \tag{14}$$

де $l_{пол}$ – повна протяжність польоту БпЛА в районі пошуку; [x] – найбільше ціле, більше або рівне x.

Кількість кадрів m, на яких є зображення об'єкта пошуку, визначається добутком кількості елементів розрішення n_3, що припадають на розмір об'єкта пошуку, і кількістю кадрів n_2, що припадають на елемент розрішення, що визначаються виразами (13), (14).

$$m = n_3 n_2; \tag{15}$$

$$n_3 = \left[\frac{l_m}{l_3}\right]. \tag{16}$$

Якщо позначити ймовірність виявлення і розпізнавання об'єкта пошуку в і-му знімку через p_i, що дорівнює p, то для розрахунку ймовірності того, що в n знімках району пошуку виявлення і розпізнавання об'єкта пошуку відбудеться не менше ніж в m знімках, можна використовувати біноміальний закон повторних випробувань [2]:

$$P_n(m) = C_n^m p^m (1-p)^{n-p}; \tag{17}$$

де $P_n(m)$ – ймовірність виявлення об'єкта пошуку оператором корисного навантаження m раз в серії з n відеокадрів; C^m_n – число сполучень з n по m, що дорівнює:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}. \tag{18}$$

© О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

Використовуючи $P_n(m)$ можна знайти вірогідність знаходження і розпізнавання об'єкта пошуку по відеоматеріалах хоча б 1 раз

$$R_{1,n} = 1 - \sum_{j=0}^{0} P_{0,n} = 1 - \prod_{i=1}^{n} q_j, \tag{19}$$

де $q_i = 1 - p_i$, $p_i = 0$ для i=1 – z; $p_i = P_{рас\ i}$ для i = z+1 – z+m; $p_i = 0$ для i= z+m – n

Звідси

$$R_{1,n} = 1 - \left(P_{pacz+1} P_{pacz+2} \cdots P_{pacz+m}\right).$$

Так як $P_{pacz+1} = P_{pacz+2} = \ldots = P_{pacz+m}$, то вираз (19) прийме вигляд:

$$R_{1,n} = 1 - P_{рас}^{m}. \tag{20}$$

Підставляючи в (20) вирази (3), (6), (7), (9), (12–16), отримаємо вираз, що дозволяє оцінити ймовірність виявлення і розпізнавання оператором корисного навантаження цілі за допомогою встановлених на БпЛА ОЕС в першому прольоті.

$$R_{1,n} = 1 - \exp\left(-0{,}015 \left(\frac{l_m f}{R h_{пол}} - 1 \right)^2 \left[\frac{\frac{l_m}{2h_{пол}\cos(\alpha)\sin\left(\frac{a_в}{2}\right)}}{\sin\left(\alpha - \frac{\alpha_в}{2}\right)\sin\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)} \right] \left[\frac{l_3}{V_{кр}} \right] \tau \right). \tag{21}$$

Час, необхідний для виконання першого прольоту БпЛА в районі пошуку, визначається виразом

$$t = \left(1_{\partial} + 1 + \pi \frac{l_1}{2}\right) \frac{l_ш}{l_1 V_{кр}} = \left(l_{кр} + 1 + \pi \frac{2h_{пол} tg\left(\frac{\alpha_г}{2}\right)}{\sin\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)} \right) \frac{l_ш}{\frac{2h_{пол} tg\left(\frac{\alpha_г}{2}\right)}{\sin\left(\alpha + \frac{\alpha_в}{2}\right)}} V_{кр}. \tag{22}$$

де $l_д$, $l_ш$ – розміри району пошуку за довжиною та шириною відповідно.

Вирази (21) та (22) показують, що ймовірність виявлення і розпізнавання об'єктів пошуку в заданому районі та час, необхідний для виконання цього пошуку, можна розрахувати за відомими характеристиками ОЕС, польоту БпЛА, розмірами району пошуку та об'єкта пошуку.

Ці залежності дозволяють вирішити зворотну задачу, коли за заданим значенням ймовірності виявлення і розпізнавання об'єкта пошуку, відомими характерис-

тиками ОЕС, розмірами району пошуку та об'єкта пошуку можна розрахувати параметри польоту БпЛА та кількість вильотів у район пошуку, що забезпечують мінімальний час пошуку.

З цією метою встановлюється порогове значення $R_{1,n}$*. З умови $R_{1,n*} \le R_{1,n}$ стосовно розмірів району і об'єкта пошуку визначають характеристики ОЕС, польоту БпЛА, при яких час пошуку об'єкта буде мінімальним.

Якщо в результаті прольоту умова $R_{1,n}* \le R_{1,n}$ не виконується, то в цьому випадку необхідно виконати наступні прольоти БпЛА в район пошуку до тих пір, поки нерівність не буде виконана.

Розрахунок $R_{1,k}$ в наступних прольотах здійснюється з використанням виразу (23), а час t визначається як добуток часу виконання одного прольоту на кількість прольотів:

$$R_{1,k} = 1 - \prod_{i=1}^{k} \left(1 - R_{1,n}\right), \tag{23}$$

де k – кількість прольотів БпЛА в районі пошуку.

6. Чисельне дослідження математичної моделі

Штат підрозділу пошуково-рятувальних робіт найчастіше містить розрахунок БпЛА DJI Mitrice 3000 [3]. Тому чисельне дослідження математичної моделі проведемо стосовно даного безпілотного літального апарату, що складається з безпосередньо літального апарата, відеокамери та пульта дистанційного керування.

Основні технічні характеристики розглянутої моделі: безпілотний літальний апарат: максимальна швидкість польоту 16 м/с (~60 км/год); максимальний час польоту ~23 хв; максимальна висота польоту 6000 м; дальність передачі відеосигналу до 2000 м; підвіс забезпечує охоплення з кутом нахилу від –90 до 30°; відеокамери: оптика EXMOR 1/2,3"; ефективні пікселі 12,4 млн (всього пікселів 12,76 млн); об'єктив з кутом огляду 94°; фокусна відстань 20 мм; еквівалентний формат 35 мм f/2,8; максимальний розмір зображення 4000x3000; режим відеозйомки FHD: 1920x1020p 24/25/30/48/50/60 fps [4].

У якості об'єкта пошуку виберемо людину, площа поперечного перетину якої описується овалом, довжина та ширина якого складають відповідно 0,75 і 0,5 м. Район пошуку представимо у вигляді квадрата зі сторонами 2000 м, виходячи з дальності передачі відеосигналу. Швидкість польоту БпЛА 60 км/год. Порогове значення ймовірності виявлення та розпізнавання об'єкта пошуку за відеоматеріалами хоча б 1 раз визначимо рівним 0,99.

Результати розрахунку часу, необхідного для виявлення та розпізнавання розрахунком БпЛА загубленої в районі пошуку людини в залежності від висоти польоту літального апарата (50–1000 м), кутів візування відеокамери 0, 10, 20, 30 градусів та технічних характеристик, наведених вище, представлені на рис. 3.

Аналіз отриманих результатів показує, що час пошуку зниклих людей загалом залежить від висоти польоту літального апарата під час пошуку та кута візування відеокамери. Найбільш суттєвою є ця залежність у діапазоні висот від 50 до 200 м та від 600 до 1000 м. У діапазоні висот від 200 до 600 м залежність практично незначно залежить від висоти польоту літального апарата та кута візування відеокамери. Різниця результатів не перевищує 3–5 хв. Отже, можна зробити висновок, що пошук доцільно вести на вказаних висотах при куті візування

 © О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

0 градусів, оскільки при цьому куті похибки визначення координат об'єкта за даними повітряної розвідки мінімальні. Отримані результати узгоджуються з практичними рекомендаціями, викладеними в [3], і вказують на адекватність представленої математичної моделі.

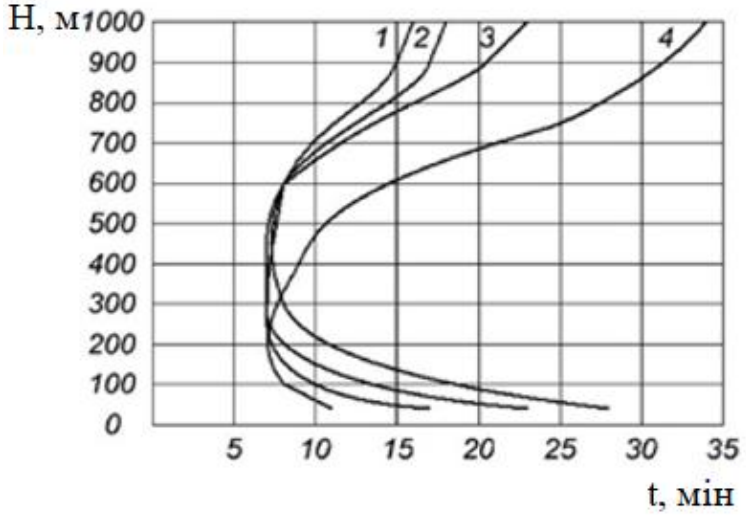


Рис. 3. Розрахункові значення часу, необхідного для виявлення і розпізнавання розрахунком БпЛА, що загубився в районі пошуку людини, при різних кутах візування: 1 – 0°, 2 – 10°, 3 – 20°, 4 – 30°

7. Обговорення результатів моделювання для оцінки ефективності розробленої математичної моделі

У процесі виконання роботи було розроблено математичну модель, яка дозволяє оцінювати ймовірність виявлення точкових цілей оператором оптико-електронної системи, встановленої на безпілотному літальному апараті. В основу моделі покладено залежності, що враховують технічні характеристики оптико-електронних систем, параметри польоту, зовнішні умови та рівень підготовки оператора. Завдяки використанню чисельного моделювання вдалося протестувати модель у різних сценаріях пошуково-рятувальних операцій. Отримані результати підтвердили її здатність забезпечувати точні прогнози навіть за складних умов, таких як погана видимість або нерівний рельєф місцевості.

Мета роботи вирішувалася комплексно. Розробка математичної моделі передбачала врахування взаємодії різних факторів, що впливають на результативність пошуку, включаючи технічні характеристики, погодні умови, динаміку польоту та людський фактор. Під час проведення чисельного моделювання були оцінені різні сценарії, які дозволили визначити найбільш впливові змінні. Експериментальна частина підтвердила відповідність теоретичних результатів реальним даним, що свідчить про коректність та адекватність розробленої моделі.

Перевагою роботи є її комплексний підхід, який поєднує теоретичний аналіз, чисельне моделювання та експериментальну перевірку. Це дозволяє використовувати отримані результати для оптимізації пошуково-рятувальних операцій у реальних умовах. Іншим важливим досягненням є врахування широкого спектра змінних, що робить модель універсальною для застосування у різних сценаріях.

Недоліком роботи є необхідність залучення значних обчислювальних ресурсів для проведення чисельного моделювання, що може обмежити її використання у разі відсутності відповідного технічного обладнання. Крім того, хоч модель і враховує основні фактори, існує ймовірність її адаптації до специфічних умов, які

не були охоплені в рамках проведених досліджень.

Загалом результати дослідження підтверджують ефективність розробленої моделі та її потенціал для впровадження у практику. Проте подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення можливостей моделі, враховуючи ще більшу кількість факторів та зменшення вимог до обчислювальних ресурсів.

8. Висновки

1. У ході дослідження була розроблена математична модель ймовірності виявлення та розпізнавання точкової цілі оператором корисного навантаження оптико-електронної системи, встановленої на безпілотному літальному апараті. Модель враховує вплив різноманітних факторів, таких як технічні характеристики оптико-електронних систем, погодні умови, тип місцевості та рівень підготовки оператора, що дозволяє точніше оцінювати ймовірність успішного виявлення цілей у реальних умовах пошуково-рятувальних операцій.

2. Результати чисельного моделювання показали, що запропонована модель здатна адекватно прогнозувати ймовірність виявлення об’єктів при різних сценаріях. Наприклад, для ситуації з високою видимістю ймовірність успішного виявлення досягає 95 %, тоді як при зниженій видимості (туман, дощ) цей показник знижується до 70–80 %. Крім того, змінюючи параметри польоту безпілотного літального апарата, такі як висота та маршрут, можна значно підвищити ефективність пошуку. Зокрема, підвищення висоти польоту на 100 метрів дозволяє збільшити ймовірність виявлення на 5–7 %, а оптимізація маршруту польоту підвищує ефективність на 10–12 %. Отримані результати свідчать про високу ефективність моделі в умовах реальних пошуково-рятувальних операцій, зокрема при пошуку зниклих осіб у важкодоступних районах. Модель дозволяє не тільки прогнозувати ймовірність успішного виявлення, а й оптимізувати використання безпілотних літальних апаратів, забезпечуючи більш ефективне планування пошукових операцій. Однак, як показали дослідження, є й певні обмеження. По-перше, модель вимагає значних обчислювальних ресурсів для виконання чисельних розрахунків, що може бути обмеженням у випадку обмежених технічних можливостей. По-друге, хоча модель враховує багато змінних, деякі фактори, такі як вплив людського фактору (наприклад, стрес або неуважність оператора), не були в повній мірі інтегровані в модель, що може знижувати її точність у реальних операціях.

Для покращення результатів в подальших дослідженнях необхідно розглянути можливість зниження вимог до обчислювальних ресурсів, а також інтеграції додаткових змінних, що можуть впливати на ефективність виявлення. Враховуючи високий потенціал моделі для практичного застосування, ці удосконалення можуть значно підвищити її точність і універсальність у пошуково-рятувальних операціях.

Література

1. Інформаційно-аналітична довідка про виникнення НС в Україні у 2023 році. URL : https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf

2. Класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019-2010 : наказ Держспоживстандарту України від 11.10.2010 № 457. База даних «Законодавство України». ВР України. URL : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text

3. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. База даних «Законодавство України». ВР України. URL : https://zakon.rada.gov.

ua/laws/show/5403-17#Text

4. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту : постанова Кабінету Міністрів України від 09.01.2014 № 11. База даних «Законодавство України» ВР України. URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text

5. Мосов С. П. Безпілотна авіація у військовій справі : колект. моногр. / та ін. Київ : Інтерсервіс, 2019. 324 с.

6. Slogget D. Drone Warfare. The Development of Unmanned Aerial Conflict. Croydon : CPI Group (UK) Ltd, 2014. 228 p.

7. Baichtal J. Building Your Own Drones: A Beginners' Guide to Drones, UAVs, and ROVs. Indianapolis : QUE, 2015. 249 p.

8. Мосов С. П. Станкевич С. А., Чумаченко С. М. Обґрунтування вимог до технічних характеристик засобів ведення розвідки пожеж із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2017. № 1 (3). С. 57–65.

9. Мосов С. П. Ера безпілотної авіації в сфері цивільного захисту. Пожежна та техногенна безпека : журн. 2020. № 11(86). С. 14–16.

10. B. Merz. Impact Forecasting to Support Emergency Management of Natural Hazards Reviews of Geohysics, 2020. 52 p.

11. Post-earthquake damage and usability assessment of Buildings: further development and applications. Final report. Anagnostopoulos S. et al. European Commission – D.G. Environment Civil Protection – EPPO, 2014. 166 p. URL: https://ec.europa.eu/echo/system/files/2014-11/peadab.pdf

12. Пошуково-рятувальні роботи за допомогою безпілотних літальних апаратів. URL: https://fireman.club/statyi-polzovateley/poiskovospasatelnyih-rabotyi-pri-pomoshhi-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov

13. Insured losses caused by man-made catastrophes worldwide 1990–2020. URL: https://www.statista.com/statistics/281059/insured-losses-from-man-made-catastrophes- worldwide/

14. Горбунов С. В. Организация мониторинга и прогнозирования чрезвычайньх ситуаций / и др. Проблеми прогнозирования. 2015. Том 5. № 2(9). С. 56–70. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-monitoringa-i-prognozirovaniya-chrezvychaynyh-situatsiy

15. Positive Spillover? Impact of the Songhua River Benzene Incident on China's Environmental Policy. URL: https://www.wilsoncenter.org/publication/positive-spillover-impact-the-songhua-river-benzene-incident-china-s-environmental

16. Anatomy oi the BP Oil Spill: An Accident Waiting to Happen. URL: https://e360.yale.edu/features/the_gulf_of_mexico_oil_spill_an_accident_waiting_to_happen

17. Emergency Response Coordination Centre (ERCC). URL: https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/emergency-response-coordination-centre-ercc_en

18. Serbia floods 2014. URL: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_emp/documents/publication/wcms_536067.pdf

19. Danish Authorities Use Drones to Monitor Sulfur Emissions of Ships. URL: https://www.maritime-executive.com/article/danes-use-drones-to-monitor-sulfur-emissions-of-_ships

20. Мосов С. П. Безпілотники попереджують надзвичайні ситуації. Пожежна та техногенна безпека : журн. 2021. № 5. С. 14–19.

21. Drones are fighting wildfires in some very surprising ways. URL: https://www.nbcnews.com/mach/science/drones-are-fighting-wildfires-some-very-surprising-ways-ncna820966

22. Probabilistic target detection by camera-equipped UAVs. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5509355

23. Jingxuan Sun, Boyang Li, Yifan Jiang, Chih-yung Wen A Camera-Based Target Detection and Positioning UAV System for Search and Rescue (SAR) Purposes. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1778

24. Mingyang Lyu, Yibo Zhao, Chao Huang, Hailong Huang Unmanned Aerial Vehicles for Search and Rescue: A Survey. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/13/3266

25. A novel UAV path planning approach: Heuristic crossing search and rescue optimization algorithm. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422022618

O. Kovalev*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
D. Yadchenko*[2]*, *Head of the Department*
A. Melnychenko*[1]*, *PhD, Senior Lecturer*
V. Sobina*[1]*, *PhD, Associate Professor Head of Department*
D. Taraduda*[1]*, *Deputy Head of Department*
O. Panchenko*[3]*, *Senior Lecturer*
[1] *National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*
[2] *Department for the Organization of Work and Use of Unmanned Systems and Robotics of the State Emergency Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[3] *National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

MATHEMATICAL MODEL OF THE PROBABILITY OF DETECTION OF A POINT TARGET BY THE OPERATOR OF AN UNMANNED AIRCRAFT

The paper develops a mathematical model of the probability of detecting a point target by an operator of an optoelectronic device installed on an unmanned aerial vehicle using the Johnson criterion and the binomial law of repeated trials. The purpose of the study is to assess the probability of detecting a target using a sensor system under various external factors. The study considers the impact of various conditions, such as lighting, weather conditions, and sensor system characteristics on the effectiveness of target detection. During the study, a mathematical model was built that allows determining the probability of successful target detection using optoelectronic devices. The model involves using the binomial law to take into account the number of detection attempts and applying the Johnson criterion to increase accuracy. This approach allows taking into account factors that reduce detection efficiency, and also allows optimizing the sensor operating parameters depending on operating conditions. The results of the study showed that with optimal sensor parameters and environmental conditions, the probability of successful detection can be significantly increased. Modeling various scenarios allows obtaining a more accurate estimate of the probability and reducing the probability of errors. These data are important for improving detection technologies, allowing for more efficient sensor tuning, which improves the accuracy and reliability of the system. The results obtained have important practical significance for optimizing the use of optoelectronic systems in unmanned aerial vehicles. This model makes it possible to minimize the risks of false positives and increase the accuracy of target detection in real conditions. Such a development is useful not only for the defense sector, but also for civilian applications, such as environmental monitoring and security.

Keywords: mathematical model, optoelectronic systems, point target, payload operator

References

1. Information and analytical reference on the occurrence of emergencies in Ukraine in 2023. Available at: https://dsns.gov.ua/upload/2/0/2/2/3/2/1/2023-rik.pdf

2. Classifier of emergencies DK 019-2010: Order of the State Consumer Stand-

© О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

ards Service of Ukraine dated 11.10.2010, 457. Database “Legislation of Ukraine”. Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text

3. Civil Protection Code of Ukraine: Law of Ukraine dated 02.10.2012, 5403-VI. Database “Legislation of Ukraine”. Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text

4. On approval of the Regulation on a unified state civil protection system: resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 09.01.2014, № 11. Database “Legislation of Ukraine”. Verkhovna Rada of Ukraine. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#Text

5. Mosov, S. P. (2019). Unmanned aviation in military affairs: collected monographs / and others. Kyiv: Interservice, 324.

6. Slogget, D. (2014). Drone Warfare. The Development of Unmanned Aerial Conflict. Croydon: CPI Group (UK) Ltd, 228.

7. Baichtal, J. (2015). Building Your Own Drones: A Beginners’ Guide to Drones, UAVs, and ROVs. Indianapolis : QUE, 249.

8. Mosov, S. P. Stankevych, S. A., Chumachenko, S. M. (2017). Justification of the requirements for the technical characteristics of fire reconnaissance means using unmanned aerial vehicles. Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety, 1(3), 57–65.

9. Mosov, S. P. (2020). The era of unmanned aviation in the field of civil protection. Fire and man-made safety: journal, 11(86), 14–16.

10. Merz, B. (2020). Impact Forecasting to Support Emergency Management of Natural Hazards Reviews of Geohysics, 52.

11. Post-earthquake damage and usability assessment of Buildings: further development and applications. Final report. Anagnostopoulos S. et al. European Commission – D.G. Environment Civil Protection – EPPO. (2014), 166. Available at: https://ec.europa.eu/echo/system/files/2014-11/peadab.pdf

12. Search and rescue operations using unmanned aerial vehicles – Access mode Available at: https://fireman.club/statyi-polzovateley/poiskovospasatelnyih-rabotyi-pri-pomoshhi-bespilotnyih-letatelnyih-apparatov

13. Insured losses caused by man-made catastrophes worldwide 1990–2020. Available at: https://www.statista.com/statistics/281059/insured-losses-from-man-made-catastrophes-worldwide/

14. Gorbunov, C. B. (2015). Organization of monitoring and forecasting of extreme situations / et al. Problems of forecasting, 5, 2(9), 56–70. Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/organizatsiya-monitoringa-i-prognozirovaniya-chrezvychaynyh-situatsiy

15. Positive Spillovers? Impact of the Songhua River Benzene Incident on China’s Environmental Policy. Available at: https://www.wilsoncenter.org/publication/positive-spillover-impact-the-songhua-river-benzene-incident-china-s-environmental

16. Anatomy of the BP Oil Spill: An Accident Waiting to Happen. Available at: https://e360.yale.edu/features/the_gulf_of_mexico_oil_spill_an_accident_waiting_to_happen

17. Emergency Response Coordination Centre (ERCC). Available at: https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/what/civil-protection/emergency-response-coordination-centre-ercc_en

18. Serbia floods. (2014). Available at: https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_emp/documents/publication/wcms_536067.pdf

19. Danish Authorities Use Drones to Monitor Sulfur Emissions of Ships. Available at: https://www.maritime-executive.com/article/danes-use-drones-to-monitor-sulfur-emissions-of- ships

20. Mosov, S. P. (2021). Drones prevent emergencies. Fire and man-made safety: journal, 5, 14–19.

21. Drones are fighting wildfires in some very surprising ways. Available at: https://www.nbcnews.com/mach/science/drones-are-fighting-wildfires-some-very-surprising-ways-ncna820966

22. Probabilistic target detection by camera-equipped UAVs. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/5509355

23. Jingxuan, Sun, Boyang, Li, Yifan, Jiang, Chih-yung, Wen. A Camera-Based Target Detection and Positioning UAV System for Search and Rescue (SAR) Purposes. Available at: https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1778

24. Mingyang, Lyu, Yibo, Zhao, Chao, Huang, Hailong, Huang. Unmanned Aerial Vehicles for Search and Rescue: A Survey. Available at: https://www.mdpi.com/2072-4292/15/13/3266

25. A novel UAV path planning approach: Heuristic crossing search and rescue optimization algorithm. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417422022618

Надійшла до редколегії: 09.10.2024
Прийнята до друку: 12.11.2024

© О. О. Ковальов, Д. М. Ядченко, А. С. Мельниченко, В. О. Собина та ін.

УДК 504.058:628.31

С. Р. Артем'єв, *к.т.н., доцент, зав. каф. (ORCID 0000-0003-4535-1990)*
О. В. Рибалова, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000–0002–8798–4780)*
О. В. Бригада, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5777-8516)*
О. В. Ільїнський, *к.б.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1737-9462)*
А. О. Мацак, *к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0003-2856-9437)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАМУЛЕННЯ ПРИСТРОЇВ ІНФІЛЬТРАЦІЇ ДОЩОВОГО СТОКУ З РІЗНИМИ ФІЛЬТРУЮЧИМИ НАСАДКАМИ

Досліджено процес замулювання на багатошарових інфільтраційних пристроях під час фільтрації дощового стоку. Замулювання пристроїв визначає їх експлуатаційний термін, однак кількісне розуміння процесу замулювання наразі є обмеженим особливо на пристроях з різною фільтруючою складовою. Тому, було проведено лабораторне дослідження процесу інфільтрації стоку, для кращого розуміння фізичних процесів замулювання. Процес замулювання вивчався за умов постійного рівня води, з концентрацією завислих речовин 80–300 мг/дм^3 з використанням чотирьох фільтруючих насадок: базальт, тирса, вапняк та пінополіуретан. Встановлено, що найбільший шар замулювання утворюється на межі між фільтром і ґрунтом через утворення мулової пробки, яка «захищає» межу фільтр/ґрунт. Проаналізовано склад мулової пробки верхнього шару, фільтруючого об'єму колони та визначено, що фізичне замулювання в основному викликане міграцією частинок осаду діаметром менше 0,05–0,071 мм (фракція яких є головною в формуванні мулової пробки). Досліджено питання розподілення завислих часток відповідно за розмірами по всьому об'єму фільтруючого пристрою. Встановлено головні фракції , які найбільш осідають та впливають на процес замулювання пристроїв. Визначено залежності між швидкістю інфільтрації дощового стоку та накопиченням завислих часток у фільтруючому шарі. Найменші показники зниження швидкості фільтрації спостерігались при використанні вапняку (40 %), пінополіуретан та базальт показали схожі результати (51 % та 55 %), найбільше зниження швидкості фільтрації припало на тирсу – 74 %. Практична значимість результатів дослідження полягає у розумінні процесів забруднення (замулювання) пристроїв очищення поверхневого стоку, що в свою чергу дає можливість модернізації систем очищення (конструкція, фільтруючі насадки тощо) та мінімізації накопичення певних фракцій завислих речовин на поверхні водозбору.

Ключові слова: дощові стічні води, замулювання, фільтрація, фільтруючі насадки, ґрунт, час фільтрування

1. Вступ

Дощові стічні води все більше використовуються в міському господарстві і розвитку сталого водокористування, особливо в умовах дефіциту води [1]. Методи інфільтраційного очищення і акумулювання стоку, такі як свердловини для закачування підземних вод [2], інфільтраційні басейни [3] і системи інфільтраційних споруд [4], можуть зберігати поверхневу воду в водоносному горизонті, тим самим допомагаючи відновити гідрологічні характеристики регіону [5]. Однак засмічення систем фільтрації є основним обмежуючим фактором, який викликає зниження швидкості інфільтрації і проникності стоку за рахунок фізичних, хімічних і біологічних процесів [7]. У інфільтраційних спорудах механічне засмічення є головним типом засмічення, за рахунок високої концентрації твердих часток, що присутні в дощових водах [8].

Системи очищення дощового стоку, наведені вище, використовують саме для швидкого відводу (фільтрації) дощових вод з поверхні водозбору, які можуть призвести до підтоплення територій та іншим негативним наслідкам. Дослідження даних параметрів дасть розуміння впливу головних чинників які впливають на цей процес (розмір фракції завислих часток, ефективність фільтруючих матеріа-

лів, розподілення часток в об'ємі споруди тощо) і за рахунок цього подальшої модернізації даних систем та підвищенню ефективності (швидкості) фільтрації поверхневого стоку з поверхні водозбору. Тому, вивчення процесу фільтрації дощового стоку і пов'язаних з цим факторів: замулення/засмічення фільтруючого шару, розмірів та розподіленню часток в фільтруючому шарі, залежності швидкості фільтрації при використанні різних фільтруючих матеріалів – є актуальним завданням.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Механічне засмічення відбувається за рахунок накопичення частинок на поверхні фільтруючого шару, або шляхом осадження всередині пористого фільтруючого матеріалу [9]. У першому випадку утворюється забруднюючий шар де скуплюються завислі тверді частинки. У другому випадку тверді частинки переміщаються через пористу поверхню фільтруючого матеріалу, в якому і залишаються [10]. Головні параметри, які впливають на відкладення завислих часток (ЗЧ) є фільтруючий матеріал [11, 12], концентрація ЗЧ [13, 14], розміри ЗЧ і фільтруючого матеріалу [15, 16], а також гідродинамічні ефекти [9, 17]. Феномен замулювання супроводжується помітними втратами напору і швидкості фільтрації стоку [18–20].

Попереднє дослідження [21] свідчить, що однієї характеристики відкладення частинок у пористому середовищі недостатньо для повного опису процесу замулювання. В даній роботі досліджено ступінь впливу мулового шару на швидкість процесів фільтрації і головна увага приділена засобам регенерації та очищення поверхні фільтруючого шару, без визначення фракційного складу осаду і головних фракцій що створюють «мулову пробку». Крім того, в даній роботі, в якості фільтруючого матеріалу використовується гравійна фракція без використання верхнього шару ґрунту і нижнього шару піску, що є критичним при розподіленні часток і значенню швидкості фільтрації. В подібних роботах [22, 23] з гравійним фільтруючим матеріалом, показано зв'язок між морфологією завислих часток і поверхнею відкладення в спорудах, однак дане розподілення не може бути достатньо точним без верхнього ґрунтового шару, а також рослинного шару, який присутній у більшості подібних споруд на урбанізованих територіях [4].

В роботах [24, 25] проведено визначення маси ЗЧ, що накопичуються по всій довжині пристрою, за час процесу фільтрації і значна увага присвячена розробці математичного моделювання процесів інфільтрації з розробкою різних моделей і прогнозних варіантів процесів замулювання, але без вивчення фракційного складу верхнього шару та на межі фільтр/ґрунт. Слід додати, що як і в наведених вище роботах, в цих дослідженнях використовують один тип фільтруючого матеріалу – звичайний пісок, без верхнього шару і рослинного покриву. Висота споруд які були використані в дослідженнях (30–40 см) не дає змоги точно визначити саме процеси розподілення ЗЧ у фільтруючому шарі і тому не може бути репрезентативною. В подібній роботі [26] розроблено емпіричні моделі для опису процесу замулювання шляхом встановлення залежності між відкладенням та втратою напору та гідравлічною провідністю та визначена залежність між швидкістю фільтрації стоку і замулення фільтруючого матеріалу (піску), але не вивчено використання інших фільтруючих матеріалів.

Замулювання виникає, коли пористі канали фільтруючих насадок є занадто малими для проходження ЗЧ, і цей процес визначається співвідношенням між діаметром часток і розміром зерен пористого середовища. В роботі [27] зафіксовані

 © С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Ілїнський та ін.

різні порогові значення ЗЧ які спричиняють ефект замулення, розміри коливаються в межах від 0,005 до 1 мм, але не встановлено головні розміри часток що формують мулову пробку на верхньому шарі пристрою і залежність між розподіленням ЗЧ при використанні різних фільтруючих насадок по всьому фільтруючому шарі.

Поточні дослідження замулювання у системах фільтрації дощових вод обмежуються вертикальними та горизонтальними пристроями, і багатьох випадках з використанням одної фільтруючої насадки, тобто суцільного фільтруючого шару який складається з одного матеріалу. Як показують дані роботи [28, 29], використання однотипної насадки добре підходить щодо вивчення процесів гідродинаміки але не відповідає системам, які впроваджуються на територіях водозбору, і які в своєму складі містять різні шари фільтруючого матеріалу і відповідно мають інші параметри фільтрації та відведення стоку. В подібних роботах вивчення процесу замулювання полідисперсних ЗЧ не завжди може бути достовірним і потребує додаткових експериментів.

Таким чином, ця робота присвячена важливому дослідженню – визначенню залежності швидкості фільтрації і розподілення ЗЧ від матеріалу фільтруючого шару та аналіз фракційного складу мулового шару (на границі фільтр/ґрунт), що формується під час фільтрації дощового стоку у вертикальному багатошаровому пристрої (колоні), в умовах контрольованій подачі забрудненої дощової води.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є дослідження процесу замулювання на багатошарових інфільтраційних пристроях під час очищення дощового стоку.

Для досягнення поставленої мети вирішували наступні завдання:

- вивчення зміни швидкості фільтрації під час замулювання на багатошарових фільтруючих пристроях з різними типами фільтруючого матеріалу;
- аналіз фракційного складу затриманих завислих часток у пористому фільтруючому середовищі пристроїв та на межі фільтр/ґрунт;
- визначення розподілення завислих часток в залежності від використання фільтруючого матеріалу по всьому об’єму фільтруючої колони.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єкт дослідження – пристрої інфільтрації дощового стоку.

Предмет дослідження – процес замулювання інфільтраційних пристроїв очищення дощового стоку, що використовуються на урбанізованих територіях.

Основна гіпотеза дослідження полягає в наступному – перевірити ймовірну залежність зміни швидкості фільтрації, розміри фракції що спричиняють процес замулення (як в самому фільтруючому матеріалі так і на поверхні фільтр/ґрунт) та проаналізувати вірогідне розподілення ЗЧ по всьому об’єму пристрою, за рахунок використання різних фільтруючих насадок у вертикальному багатошаровому інфільтраційному пристрої очищення дощового стоку;

Для перевірки гіпотези використовували експериментальну модельну установку (рис.1) яка складається з плексигласового короба з шириною сторін 12 см та довжиною основної частини 55 см, які звужуються до низу. Представлена модельна споруда завантажувалась фільтруючим матеріалом, та включала в себе крім піску та верхнього шару ґрунту, фільтруючі насадки, що призводять до затримання ЗЧ та підвищення адсорбції органічної речовини, і як результат формують більш якісне очищення дощового стоку. Пристрій має отвір на виході, закритий фільтром.

Цей фільтр з отворами діаметром 2 мм дозволяє очищеному стоку проходити, але не пропускає частинки фільтруючого матеріалу. Внизу пристрою знаходиться вентиль для зливу очищеного фільтрату та патрубок для відбору проб.

Багатошарова система пристрою: ґрунт, фільтруюча насадка, шар піску – дозволяє якісніше очищувати забруднений дощовий стік (за рахунок фільтруючої насадки) та швидше виводити очищену воду ніж споруди з одношаровим заповненням.

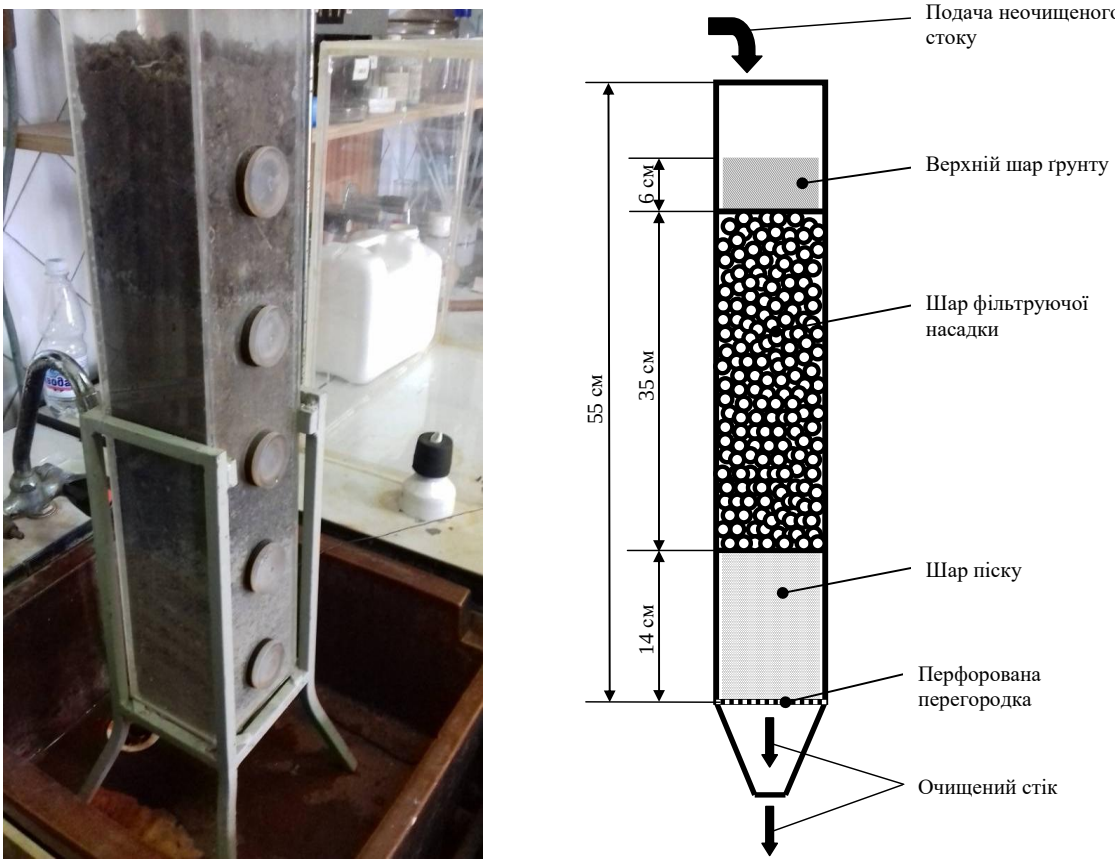


Рис.1. Експериментальна установка очищення дощового стоку

Вибір фільтруючих насадок зроблений на основі аналізу літературних джерел та експериментальних досліджень, проведених при виконанні попередніх робіт [30, 31] (рис. 2).

а) **б)** **в)** **г)**

Рис. 2. Фільтруючі насадки: а – деревинна тирса; б – базальт; в – пінополіуретан (ППУ); г – вапняк

Деревинна тирса (10–0,2 мм) була використана завдяки своєї економічної доступності. Водночас є побічним продуктом, твердим відходом лісопереробних підприємств і до теперішнього часу вивозиться на полігони ТПВ. Дана фільтруюча насадка має добрі адсорбційні властивості та дуже легко піддається заміні і деструкції.

© С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Ілїнський та ін.

Базальтова крихта (фракція 2–0,5 мм) є відвалом при виробництві більш крупної фракції на кар'єрах гірничо-видобувного комплексу.

Гранули ППУ (розміром 1–3 см) зарекомендували себе як дуже стійкі до погодних умов, та своїми адсорбційними властивостями , крім того даний вид матеріалу дуже легко піддається регенерації.

Вапняк (фракція 2–3 см) був використані як матеріал, який має добрі сорбційні властивості щодо органічних домішок, та є технічно та економічно доступним для використання в якості фільтруючої насадки.

Штучно-зроблена дощова вода, що містить концентрацію ЗЧ, які характерні для міських дощових вод [32, 33], була підготовлена в ємності 200 дм^3. Цільова концентрація завислих речовин становила 80–300 мг/дм^3, з ЗЧ, що мають діаметр (d)=0,025–1,5 мм. Для збереження рівномірної концентрації ЗЧ, було застосовано механічне перемішування. Підготовлена вода додавалась в колонку трохи вище фільтруючого шару за допомогою обертової форсунки.

На початку експерименту фільтруючий шар пристрою промивали дистильованою водою. Після того, як швидкість потоку, що виводиться, ставала стабільною (для забезпечення надійних вимірювань), додавали підготовлену дощову воду згідно плану експерименту. Кожен експеримент проводився до швидкості витоку, який коливався від 10 % до 25 % від початкового. Експериментальну колону потім обережно розбирали і вимірювали масу осаду, що сформувалась на верхньому фільтруючому шарі і по всьому об'єму завантаження.

В табл. 1 зазначено кількість і параметри проведених експериментів.

Табл. 1. Деталі експерименту

	Фільтруюча насадка			
	Тирса	Базальт	Вапняк	ППУ
Рівень води, см	1	1	1	1
Завислі речовини, мг/дм^3	190	180	180	210
Початкова швидкість фільтрації (v_0), дм^3/хв	0,05	0,029	0,1	0,19
Кінцева швидкість фільтрації, дм^3/хв (% від $v_{0\%}$)	12	22	15	14
Час експерименту, день	21	21	21	21

Всі експерименти проводили з постійним рівнем води на межі фільтр/ґрунт. Концентрацію завислих речовин, у підготовленій воді, вимірювали кожен раз на початку експерименту за методикою [34].

Швидкість фільтрації крізь кожну колону (в залежності від використаної фільтруючої насадки) встановлювалась експериментально – промиванням дистильованої води, та визначенням v_0 за допомогою секундоміру.

Для вивчення залежності швидкості фільтрації і обробки даних використовували програмне забезпечення Office Excel, як для визначення параметрів фільтрації (V_n та $v_{0\%}$) так і для побудови графічного матеріалу (графіки залежності/розподілення).

Фракційний склад осаду, на межі фільтр/ґрунт та в об'ємі пристрою, аналізувався за методикою [35]. Процес визначення фракції мулового шару проводився в певні етапи:

– відбір та зважування сформованого мулового шару на поверхні приладу та в об'ємі фільтруючого пристрою на лабораторних вагах Radwag AS 220.R2;

– сушка до постійної маси осаду в сушильній шафі за температурою 105 °С;

– фракційне розподілення на лабораторному віброситі CISA BA 200N з ситовими порядками 0,05–0,15 мм.

Після фракціонування процентний відсотковий склад мулового шару оброблявся в Office Excel за попередньо розробленою формулою.

5. Дослідження процесу замулювання інфільтраційний пристроїв очищення дощового стоку

5.1. Вивчення зміни швидкості фільтрації під час замулювання

Зміни швидкості фільтрації, на протязі всього експерименту, визначались для кожного типу фільтруючої насадки.

Розрахунок зменшення швидкості фільтрації визначався за формулою:

$$V_n = V_0 \cdot (1 - (a \cdot n)), \quad (1)$$

де V_n – швидкість фільтрації на n-й день, V_0 – початкова швидкість фільтрації, α – емпіричний коефіцієнт, що враховує вплив замулювання (0,05), n – кількість днів.

Як видно з графіку (рис. 3) за час проведення експерименту швидкість фільтрації по всім фільтруючим насадкам від початкових значень V_0 поступово зменшувалась. Збільшення мулової «пробки» на поверхні верхнього шару (ґрунту) призводить до зменшення витоку фільтрату та уповільнює процеси очищення.

Найбільш суттєве зменшення швидкості фільтрації було зафіксовано на насадці з тирси. Вона продемонструвала зниження швидкості на 74 %, що вказує на значне накопичення осаду на її поверхні і збільшення щільності фільтруючого матеріалу. Початкова швидкість фільтрації становила 0,05 дм³/хв, але до кінця експерименту знизилася до 0,013 дм³/хв. Це може свідчити про те, що органічні матеріали, такі як тирса, піддаються швидшому замуленню через їх природну пористість та схильність до затримання дрібних часток.

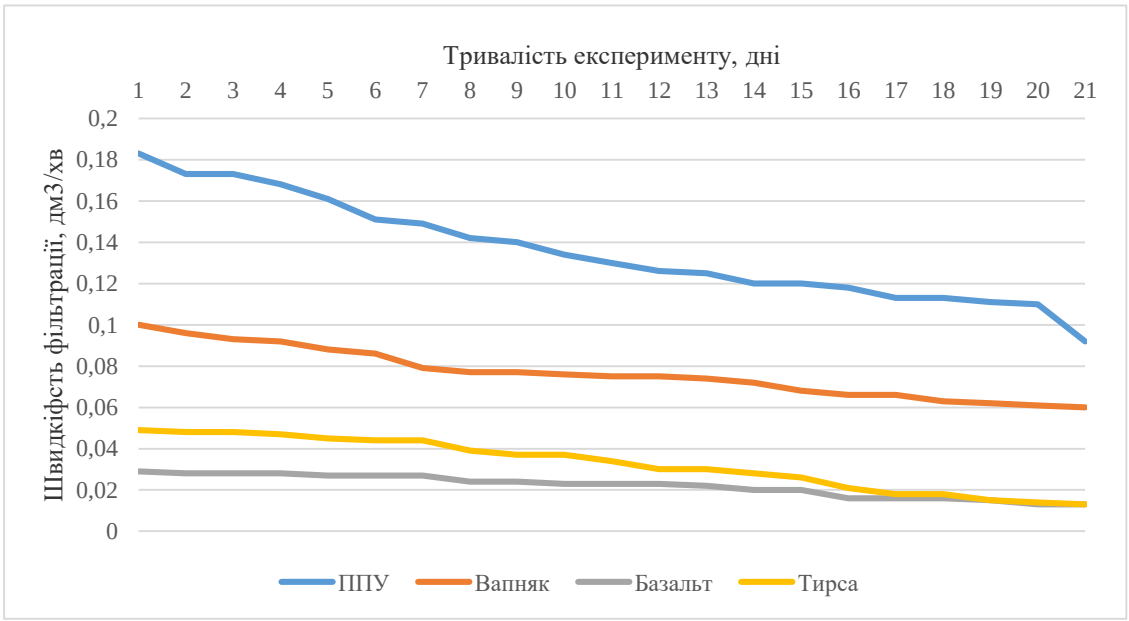


Рис. 3. Зменшення швидкості фільтрації (v_0) за час проведення експерименту

Насадки з ППУ та базальту продемонстрували схожі результати зменшення швидкості фільтрації. На пінополіуретані швидкість зменшилась на 51 % (з 0,19 дм³/хв до 0,092 дм³/хв), що може бути пов'язано зі структурою матеріалу, який має відносно великий об'єм для захоплення часток осаду та значну порис-

© С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Ілїнський та ін.

тість. Базальт, зі зменшенням швидкості на 55 % (з 0,029 дм³/хв до 0,013 дм³/хв), також показав схильність до помірного замулення, ймовірно через його текстуровану поверхню, яка затримує осад.

Найменший рівень зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на вапнякових гранулах — лише 40 % (з 0,1 дм³/хв до 0,06 дм³/хв). Це свідчить про те, що вапняк, можливо, має кращу здатність пропускати воду навіть при накопиченні осаду, що робить його перспективним матеріалом для використання в фільтраційних системах, які піддаються високому навантаженню ЗЧ.

Крім того сформований верхній шар осаду заважає фільтрації інших часток в глиб пристрою, саме за рахунок формування мулової пробки (рис. 4).

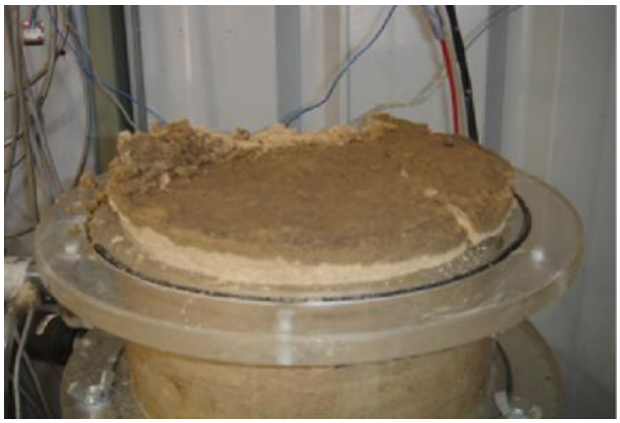


Рис. 4. Мулова пробка після проведення експерименту

Загалом, ці результати вказують на те, що вибір фільтруючого матеріалу суттєво впливає на ефективність системи фільтрації дощового стоку та її стійкість до замулення.

5.2. Аналіз фракційного складу осаду

Також, на протязі дослідження, виявлено, що процес фільтрації дощового стоку крізь різні насадки призводить до нерівномірного розподілення ЗЧ по всьому об'єму фільтруючого матеріалу (рис. 5).

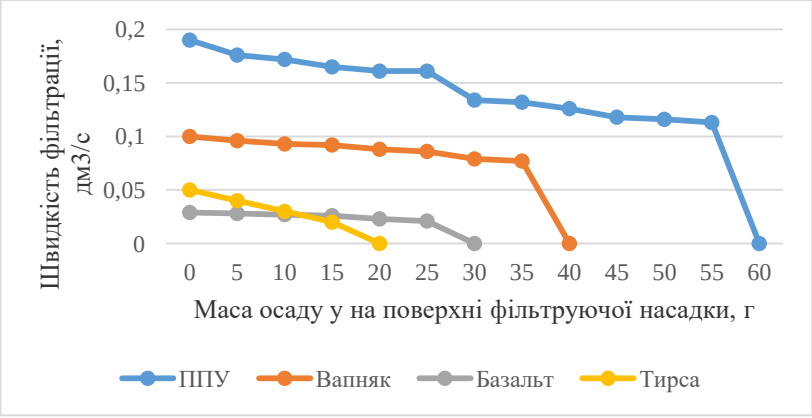


Рис. 5. Залежність швидкості фільтрації стоку від розповсюдження маси на фільтруючій насадці (по всьому периметру пристрою)

Це явище особливо помітне при використанні насадок з ППУ та вапняку. З отриманих результатів видно, що саме ці матеріали сприяли накопиченню найбіль-

шої кількості осаду. Маси осаду, які осідали в фільтруючому матеріалі з ППУ та вапняку, складали від 40 до 60 г, що значно перевищує показники інших фільтруючих насадок. Такий результат можна пояснити фізичними характеристиками матеріалів: великі проміжки між частками вапняку і пориста структура ППУ забезпечують більший простір для осадження завислих часток, що збільшує їх загальну кількість у фільтрі.

Визначимо фракційний склад осаду. Важливим чинником, що впливає на розподілення осаду, є не лише структура фільтруючого матеріалу, але й фракційний склад самого осаду. Як показали результати дослідження (табл. 2), основну частину осаду складають частки з діаметром d=0,05–0,071 мм. Саме ці частки виявилися найбільш схильними до осадження як на межі фільтр/ґрунт, так і по всій довжині фільтруючого матеріалу. Така фракція дрібних часток має високу ймовірність проникати глибоко в пори фільтру і накопичуватися там, поступово викликаючи процес замулення.

Табл. 2. Фракційний склад мулового осаду

	Фракція, мм				
	≤0,05	0,05 – 0,071	0,071 – 0,08	0,08 – 0,09	0,09 – 0,15
Склад осаду, %	12	43	22	10	12

Особливу увагу варто звернути на те, що навіть за різних умов експерименту (фільтруючі насадки) основною фракцією осаду залишаються частки діаметром d=0,05–0,071 мм, що свідчить про їх критичну роль у формуванні мулової пробки. Відповідно, аналіз складу завислих часток та розуміння їх поведінки у фільтруючих насадках є ключовим для оцінки ефективності роботи інфільтраційних систем. Встановлення залежності між фракційним складом осаду, типом фільтруючого матеріалу та розподіленням маси осаду дозволяє зробити висновки про можливі шляхи підвищення ефективності фільтраційних систем.

Протягом перших днів експерименту швидкість фільтрації знижувалась не так швидко, оскільки новий фільтруючий матеріал активно захоплює частки. Однак, після досягнення певного рівня замулювання процес стає більш стабільним, хоча швидкість фільтрації продовжує знижуватись.

Таким чином, експериментальні дані показують, що для забезпечення стабільної та ефективної роботи інфільтраційних систем важливо враховувати як фізичні властивості фільтруючого матеріалу, так і фракційний склад завислих часток.

Матеріали з великими порами або проміжками, такі як ППУ та вапняк, можуть ефективніше затримувати осад, проте цей процес може також призводити до замулення, якщо не контролювати вміст дрібних часток у поверхневих стоках.

5.3. Розподілення затриманих завислих часток у пористому середовищі та на межі фільтр/ґрунт

Спостереження щодо розподілу фракційного складу ЗЧ по об'єму фільтруючих насадок в експерименті дозволило краще зрозуміти процес замулення та основні чинники, що впливають на нього. Одним із ключових результатів дослідження стало виявлення домінуючої ролі часток діаметром 0,05–0,071 мм. Ці частки склали 43 % загального складу осаду і показали найбільшу схильність до накопичення в фільтруючих насадках (рис. 6).

У той же час, частки менших розмірів, ≤0,05 мм, хоча і становили 12 % складу осаду, мали менший вплив на загальне замулення через їх здатність руха-

 © С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Ілїнський та ін.

тись через пори фільтраційних насадок без значного накопичення. Більш крупні фракції (0,09–0,15 мм) також складали 12 % від загального складу, але через свої розміри ці частки менш активно накопичувалися у фільтрі, оскільки часто залишались на поверхні або осідали поблизу межі фільтр/ґрунт.

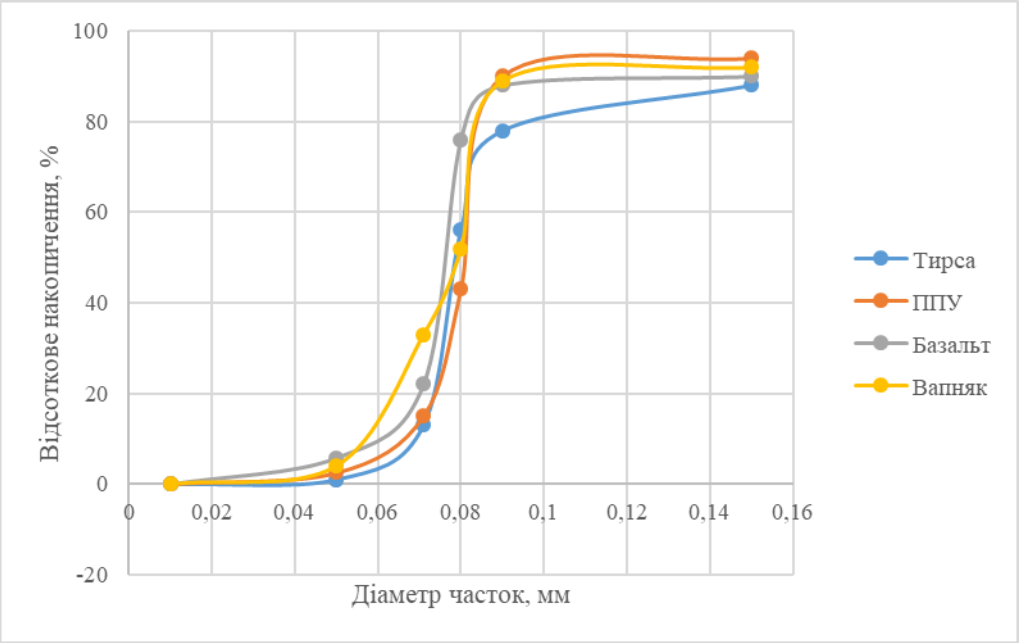


Рис. 6. Розподілення часток за середнім розміром по фільтруючим насадкам

Частки діаметром 0,071–0,08 мм (22 %) та 0,08–0,09 мм (10 %) також активно накопичувалися у фільтруючому шарі, проте їх вплив на загальний процес замулення був дещо менший порівняно з фракцією 0,05–0,071 мм. Це можна пояснити тим, що частки трохи більших розмірів швидше осідають на поверхні, не проникаючи глибоко в структуру фільтруючого матеріалу.

Ці спостереження дозволяють зробити висновок, що фільтруючі насадки найбільше схильні до накопичення осаду фракцій 0,05–0,071 мм, і цей результат був підтверджений у всіх пристроях, незалежно від типу фільтруючого матеріалу.

Крім того, частки цього діаметру виявилися найбільш стійкими до промивання і залишались у фільтрі навіть при постійному рівні води над поверхнею фільтр/ґрунт. Це підтверджує їхню ключову роль у формуванні мулової пробки та поступовому зменшенні швидкості фільтрації.

Таким чином, найбільше розподілення часток 0,05–0,071 мм в осаді свідчить про необхідність врахування їхнього впливу при плануванні експлуатації інфільтраційних систем. Розуміння фракційного складу осаду дозволяє оптимізувати процеси очищення та технічного обслуговування для уникнення критичного замулення фільтруючих насадок.

6. Обговорення необхідності вивчення процесу замулення в інфільтраційних пристроях очищення

Проведений аналіз показав, що важливим аспектом процесу замулення фільтруючих пристроїв дощового стоку є не тільки концентрація ЗЧ у поверхневому стоці, а і використання різних типів фільтруючих матеріалів, що в свою чергу впливають на швидкість фільтрації та ступінь відкладення мулового шару як на поверхні так і по всьому об’єму пристрою. Також, розмір ЗЧ, що формують муловий шар і відкладаються по всій поверхні насадок дав розуміння щодо головних фракцій які відповіда-

ють за процес замулювання навіть при використанні різних фільтруючих насадок.

Виходячи з цього, в роботі була виконана перевірка залежності швидкості фільтрації дощового стоку з використанням модельних експериментальних вертикальних споруд з різною фільтруючою насадкою. Для цього використано певні фільтруючі матеріали: тирса, базальт, гранули ППУ та вапняк. Найкращій результат під час всього експерименту показали колона з використанням вапнякових гранул (зменшення швидкості 40 %), насадки з ППУ, базальту та тирси мають менші значення (51 %, 55 % та 74 % відповідно). Даний результат може свідчити про доцільність використання і продовження досліджень різних фільтруючих матеріалів з різною пористою поверхнею, вагою та щільністю. Використання гравію або піску як суцільного фільтруючого шару не завжди є ефективним як з точки зору швидкості фільтрації і відведення стоку з поверхні так і з точки зору процесів замулення і очищення дощового стоку.

Також, в роботі було визначено головні фракції мулового шару, що відповідальні за процес формування «пробки» та розповсюдження по всьому об'ємі споруді і фільтруючого матеріалу з використанням різних фільтруючих насадок. Аналіз формування мулового відкладення розглядався попередніми дослідженнями без врахування верхнього шару ґрунту і з однорідним фільтруючим наповнювачем, що має під собою наукову цінність але не відповідає реальним умовам та спорудам які використовуються на урбанізованих територіях. Визначено головну фракцію яка відповідає за формування мулового шару як на поверхні так і по всьому об'єму колони.

Продемонстровано розподіл визначених фракції ЗЧ по всьому об'єму фільтруючої споруди з використанням чотирьох фільтруючих насадок. Отримано конкретні дані щодо розподілу часток по всім спорудам з різними фільтруючими матеріалами. Різниця розподілення ЗЧ по об'єму з використанням різних матеріалів дає змогу вивчити процес швидкості замулення і тим самим сформувати більш ефективні конструкції систем очищення поверхневого стоку ніж в спорудах з однотипним наповнювачем (гравій або пісок).

Звичайно, дані дослідження проводились в лабораторних умовах і потребують подальшого вивчення з накопиченням даних щодо процесів замулення і аналізів відповідних параметрів.

Як слабкі сторони дослідження можна навести конструкційні особливості колон – в міських умовах біотраншеї/мульди/фільтруючі канави виглядають інакше (мають значний дренажний шар, геотекстильне шарування тощо), що може бути певним недоліком даної роботи і можливого доопрацювання у майбутньому.

Також, слід зазначити відсутність рослинного покриву, на верхньому шарі ґрунту, як в даній роботі так і більшості досліджень цього напрямку. Рослинний покрив, є критичним для споруд фільтрації особливо в міських умовах, тому подальші дослідження слід, за можливості виконувати саме з ним. Крім того слід розглянути питання витрати (подачі) стоку на фільтруючі колони: подача відбувається без врахування природних особливостей ґрунту (коефіцієнту фільтрації) та інтенсивності зрошування, що також може бути перспективним завданням для подальших робіт.

Таким чином, дослідження процесу замулення в інфільтраційних пристроях є необхідним не лише для покращення їхньої експлуатації, але й для забезпечення тривалого терміну служби. Знання, отримані в результаті таких досліджень, сприяють зниженню витрат на обслуговування та підвищенню екологічної безпеки урбанізованих територій.

© С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Ілїнський та ін.

7. Висновки

1. Проведено дослідження залежності швидкості фільтрації (v_0) від використання різних видів фільтруючих матеріалів. Найбільш суттєве зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на насадці з тирси, вона продемонструвала зниження швидкості на 74 %. Це може свідчити про те, що органічні матеріали, такі як тирса, піддаються швидшому замуленню через їх природну пористість та схильність до затримання дрібних часток. Насадки з ППУ та базальту продемонстрували схожі результати зменшення швидкості фільтрації. На пінополіуретані швидкість зменшилась на 51 % (з 0,19 дм³/хв до 0,092 дм³/хв), що може бути пов'язано зі структурою матеріалу, який має відносно великий об'єм для захоплення часток осаду та значну пористість. Базальт, зі зменшенням швидкості на 55 % (з 0,029 дм³/хв до 0,013 дм³/хв), також показав схильність до помірного замулення, ймовірно через його текстуровану поверхню, яка затримує осад. Найменший рівень зменшення швидкості фільтрації зафіксовано на вапнякових гранулах — лише 40 % (з 0,1 дм³/хв до 0,06 дм³/хв). Це свідчить про те, що вапняк, можливо, має кращу здатність пропускати воду навіть при накопиченні осаду, що робить його перспективним матеріалом для використання в фільтраційних системах, які піддаються високому навантаженню ЗЧ.

2. Досліджено, що мулова пробка, на верхньому шарі споруди, складається з завислих часток фракцією: ≤0,05 мм – 12 %, 0,05–0,071 мм – 43 %, 0,071–0,08 мм – 22 %, 0,08–0,09 мм – 10 %, 0,09–0,15 мм – 12 %, які поступово накопичуються, знижуючи проникність фільтру та збільшуючи опір проходженню води. Таким чином, найбільше замулювання спостерігається на поверхні фільтра або в його верхньому шарі, що потребує врахування в дизайні та експлуатації систем фільтрації дощового стоку. Аналіз складу мулової пробки у верхньому шарі фільтраційної колони та в її об'ємі вказує на те, що основну роль у замулюванні відіграють дрібнодисперсні частки осаду діаметром від 0,05–0,071 мм. Ці частки становлять значну частину завислого матеріалу, і є головним чинником, який призводить до фізичного замулювання. Частинки даного розміру мають високу схильність до міграції всередині фільтруючого шару, оскільки їхні розміри дозволяють їм легко проникати в пори фільтруючого матеріалу, але вони досить великі, щоб з часом осідати і блокувати їх. Це призводить до поступового зниження швидкості фільтрації та ефективності систем очищення. Це підкреслює важливість зменшення концентрації завислими речовин у воді перед її потраплянням у систему фільтрації або застосування відповідних технологій, які зможуть ефективно затримувати та виводити такі частки без утворення значного осаду.

3. Визначена домінуюча роль часток діаметром 0,05–0,071 мм. Ці частки склали 43 % загального складу осаду і показали найбільшу схильність до накопичення в фільтруючих насадках У той же час, частки менших розмірів, ≤0,05 мм, хоча і становили 12 % складу осаду, мали менший вплив на загальне замулення через їх здатність рухатись через пори фільтраційних насадок без значного накопичення. Більш крупні фракції (0,09–0,15 мм) також складали 12 % від загального складу, але через свої розміри ці частки менш активно накопичувалися у фільтрі, оскільки часто залишались на поверхні або осідали поблизу межі фільтр/ґрунт. Частки діаметром 0,071–0,08 мм (22 %) та 0,08–0,09 мм (10 %) також активно накопичувалися у фільтруючому шарі, проте їх вплив на загальний процес замулення був дещо менший порівняно з фракцією 0,05–0,071 мм. Ці спостереження до-

зволяють зробити висновок, що фільтруючі насадки найбільше схильні до накопичення осаду фракцій 0,05–0,071 мм, і цей результат був підтверджений у всіх пристроях, незалежно від типу фільтруючого матеріалу. Таким чином, загальне зменшення швидкості інфільтрації обумовлене комбінацією розмірів часток та їхньої здатності до осідання, що вимагає подальших досліджень для оптимізації процесу очищення дощових стоків.

Література

1. Liping J., Binhui J., Xin Z. Research progress on dispersibility in subsurface infiltration system for treatment of domestic sewage. China Institute of environmental sciences. 2014. P. 843–854. doi: 10.1145/3070617.307064

2. Pan J., Yu L. Characteristics of subsurface wastewater infiltration systems fed with dissolved or particulate organic matter. International Journal of Environmental Science and Technology. 2015. P. 479–488. doi: 10.1007/s13762-013-0408-8

3. Sobotkova M., Dusek, J., Alavi G., Sharma L., Ray C., Assessing the feasibility of soil infiltration trenches for highway runoff control on the Island of Oahu, Water. 2018. Vol. 11(3) P. 1–19. doi: 10.3390/w10121832

4. Tu M.C., Traver R. Clogging impacts on distribution pipe delivery of street runoff to an infiltration bed. Water. 2018. P. 1–14. doi: 10.3390/w10081045

5. Toran L., Jedrzejczyk, C., Water level monitoring to assess the effectiveness of stormwater infiltration trenches. Environmental and Engineering Geoscience. 2017. P. 1–14. doi: 10.2113/EEG-1802

6. Developing Reasonable Assurance: A Guide to Performing Model - Based Analysis to Support Municipal Stormwater Program Planning: US EPA. 2017. P. 51. URL: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/dev-reasonable-assur-guide-model-base-analys-munic-stormw-prog-plan-2017-02.pdf

7. Improving Stormwater Program Monitoring, Evaluation, Tracking, and Reporting: Workshop Report and Recommendations. 2018. P. 65. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/improving_stormwater_program_monitoring-10-12-2018.pdf

8. Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources Modeling Framework: National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina: URL: https://www.epa.gov/hydrowq/better-assessment-science-integrating-point-and-non-point-sources-basins

9. Selbig W. R., Characterizing the distribution of particles in urban stormwater: advancements through improved sampling technology. Urban Water Journal. 2015. P. 1–11. doi: 10.1080/1573062X.2013.820334

10. Rossman L., Huber W. Storm Water Management Model Reference Manual Volume I: US EPA Office of Research and Development, Washington, DC, 2015. 233 p. URL: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=309346

11. Pitt R. E., Clark S. E., Eppakayala V. K., Sileshi R. Don’t throw the baby out with the bathwater: sample collection and processing issues associated with particulate solids in stormwater. Journal of Water management and Modeling. 2016. P 1–13. doi: 10.14796/JWMM.C416

12. Petrucci G., Bonhomme C. The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration, and

geographical data. Journal of Hydrology. 2014. P. 1–53. doi: 10.1016/j. jhydrol.2014.06.019

13. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice. Desalination Water Treat. 2015. P. 3127–3133. doi: 10.1080/19443994.2014.922287

14. Kandra H. S., McCarthe D., Fletcher T. D., Deletic A. Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment. Journal of. Hydrology. 2014. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009

15. Segismundo E. Q., Koo B. H., Lee B. Effects of Media Breakage on Infiltration Characteristics in Stormwater Management System. Journal of the Korean Geotechnical Society. 2016. P. 31–41. doi: 10.7843/kgs.2016.32.2.31

16. Segismundo E. Q., Kim L. H., Jeong S. M., Lee B. S. A Laboratory Study on the Filtration and Clogging of the Sand-Bottom Ash Mixture for Stormwater Infiltration Filter Media. Water. 2017. P. 32. doi: 10.3390/w9010032

17. Segismundo E. Q. Experimental Analysis of Particle Breakage and Clogging Potential for Granular Filter Media Used in Stormwater Management Systems. Master's thesis. 2016. P. 1–10. URL: https://hal.science/hal-03296735/document

18. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. Assessment and development of design criteria for a hybrid stormwater treatment system. Desalination and Water Treatment. 2017. P. 418–424. doi: 10.5004/dwt.2017.11447

19. Kandra H. S., Deletic A., McCarthy D. Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters. Water Resources Management. 2014. P. 1873–1885. doi: 10.1007/s11269-014-0573-7

20. Lee B., Kim L.H., Jeon P.G., Segismundo E. Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility. Journal Korean Society. 2014. P. 427–437. doi: 10.9798/KOSHAM.2014.14.6.427

21. Operation and maintenance of infiltration trench. In Minnesota. Stormwater manual, 2016 532 p. URL: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Operation_and_maintenance_of_stormwater_infiltration_practices

22. El Mansouri B., Enhancement of groundwater potential by aquifer artificial recharge techniques. Climate change. 2015. P. 155–156. doi: 10.5194/piahs-366-155-2015

23. Sadiki M. L., Improvement of groundwater resources potential by artificial recharge technique: a case study of charf el Akab aquifer in the Tangier region, Morocco. 2019. P. 224–236. doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2019.03.003

24. El Mezouary L. Coupling of numerical flow model with the Susceptibility Index method to assess the groundwater vulnerability to pollution. Water Resources. 2020. P. 1–5. doi: 10.1145/3399205.3399246

25. El Mezouary L. Modélisation numérique de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère. Magra Italie. 2015. P. 25–31. doi: 10.1051/lhb/20150015

26. Manual of Nonpoint Source Pollutant Treatment Facility: Korea. Ministry of Environment, 2014. 282 p. URL: https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkozje))/rference/referencespapers?referenceid=1347469

27. Kandra H. S., McCarthy D., Fletcher T. D., Deletic A. Assessment of Clogging Phenomena in Granular Filter Media used for Stormwater Treatment, Journal of Hydrology. 2014. P. 518–527. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009

28. Yong C. F., McCarthy D. T., Deletic, A. Predicting Physical Clogging of Porous Permeable Pavements, Journal of Hydrology. 2013. P. 48–55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.009

29. Atlabachew A.; Shu L.; Wu P.; Zhang Y.; Xu Y. Numerical modeling of solute transport in a sand tankphysical model under varying hydraulic gradient and hydrological stresses. Hydrogeololgy Journal. 2018. P. 2089–2113. doi: 10.1007/s10040-018-1758-6

30. Мацак А. О. Підвищення рівня екологічної безпеки водних об'єктів шляхом зменшення впливу дощових стічних вод з урбанізованих територій: дисс канд. тех. наук: 21.06.01/ Український Науково-Дослідний Інститут Екологічних Проблем, Харків, 2021. 151 с. URL: https://uacademic.info/ua/document/0421U100725

31. Rybalova O. V., Matsak A. O. Natural methods of surface runoff treatment. Third International Conference of European Academy of Science. Bohn, Germany. 2018. P. 85-86. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8806/1/Natural%20methods%20of%20surface%20runoff%20treatment.pdf

32. Matsak A., Tsytlishvili K. Using different filter media of stormwater treatment performace. Norwegian Journal of development of the International Science. 2018. P. 19-23. URL: https://www.calameo.com/read/005798408dafeae98e9ba

33. Горбань Н. С., Зінченко І. В., Мацак А. О. Підвищення екологічної безпеки водних об'єктів шляхом використання методів попереднього очищення дощових стічних вод. Проблеми охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки. 2015 С. 87–90. URL: http://www.niiep.kharkov.ua/node/2760

34. ДСТУ 4082-2002 Паливо тверде. Ситовий метод визначання гранулометричного складу [Чинний від 2006-06-07] Київ, 2006. 24 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75811

35. РНД 03-05-2002 Методика виконання вимірювань масової концентрації завислих речовин: Харків, 2002. 15 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0107508-04#Text

S. Artemiev, *PhD, Associate Professor, Head of the Department*
O. Rybalova, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Brihada, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Ilinskyi, *PhD, Associate professor, Senior Lecturer of the Department*
A. Matsak, *PhD, Lecturer of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

THE STUDY OF THE CLOGING PROCESS OF STORMWATER INFILTRATION SYSTEMS WITH VARIOUS FILTER NOZZLES

The process of siltation on multilayer infiltration devices during filtration of stormwater runoff has been studied. Silting of devices determines their operational capacity, nevertheless the quantitative understanding of the silting process is quite limited, especially on devices with different filtering noozles. Therefore, a laboratory study of the effluent infiltration process has been conducted to better understand the physical processes of siltation. The silting process has been studied under conditions of a constant water level, with a concentration of suspended solids of 80-300 mg/dm^3 using four filtering nozzles: basalt, sawdust, limestone and polyurethane foam. It has been discovered that the largest layer of silting is formed at the boundary between the filter and the soil due to the formation of a sludge plug, which "protects" the filter/soil boundary. The composition of the sludge plug of the upper layer filtering the volume of the column has been analyzed and it was determined that the physical siltation is mainly caused by migration of sediment particles with a diameter of less than 0.05–0.071 mm (the fraction of which is the main one in the formation of the sludge plug). The issue of distribution of suspended solids

 © С. Р. Артем'єв, О. В. Рибалова, О. В. Бригада, О. В. Іліїнський та ін.

according to size throughout the volume of the filtering device has been studied. The main fractions that most adhesion and affect the process of silting devices have been established. Relationships between the rate of infiltration of stormwater runoff and the accumulation of suspended solids in the filter layer has been determined. The lowest rates of decrease in filtration rate have been observed when using limestone (40 %), polyurethane foam and basalt showed similar results (51 % and 55 %), the largest decrease in filtration rate was in sawdust – 74 %. The practical significance of the results of the study lies in understanding the processes of pollution (siltation) of surface runoff treatment devices, which in turn makes it possible to modernize cleaning systems (design, filter nozzles, etc.) and minimize the accumulation of certain fractions of suspended solids on the surface of the watershed.

Keywords: stormwater, clogging, filtration, filtering nozzles, soil, filtration time

References

1. Liping, J., Binhui, J., Xin, Z. (2014). Research progress on dispersibility in subsurface infiltration system for treatment of domestic sewage. China Institute of environmental sciences, 91(5), 843–854. doi: 10.1145/3070617.307064

2. Pan, J., Yu, L. (2015). Characteristics of subsurface wastewater infiltration systems fed with dissolved or particulate organic matter. International Journal of Environmental Science and Technology, (12), 479–488. doi: 10.1007/s13762-013-0408-8.

3. Sobotkova, M., Dusek, J., Alavi, G., Sharma, L., Ray, C. (2018). Assessing the feasibility of soil infiltration trenches for highway runoff control on the Island of Oahu, Water, 11(3), 1–19. doi: 10.3390/w10121832.

4. Tu, M., Traver, R. (2018). Clogging impacts on distribution pipe delivery of street runoff to an infiltration bed. Water, 10(8), 1–14. doi: 10.3390/w10081045.

5. Toran, L., Jedrzejczyk, C. (2017). Water level monitoring to assess the effectiveness of stormwater infiltration trenches. Environmental and Engineering Geoscience. 1–14. doi: 10.2113/EEG-1802.

6. Developing Reasonable Assurance: A Guide to Performing Model. (2017). Based Analysis to Support Municipal Stormwater Program Planning: US EPA. Available at: https://www.epa.gov/system/files/documents/2021-12/dev-reasonable-assur-guide-model-base-analys-munic-stormw-prog-plan-2017-02.pdf.

7. Improving Stormwater Program Monitoring, Evaluation. (2018). Tracking, and Reporting: Workshop Report and Recommendations, Chicago, USA. Available at: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-10/documents/improving_stormwater_program_monitoring-10-12-2018.pdf.

8. Better Assessment Science Integrating Point & Non-point Sources Modeling Framework: National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina: Available at: https://www.epa.gov/hydrowq/better-assessment-science-integrating-point-and-non-point-sources-basins

9. Selbig, W. R. (2015). Characterizing the distribution of particles in urban stormwater: advancements through improved sampling technology. Urban Water Journal, 12(2), 1–11. doi: 10.1080/1573062X.2013.820334.

10. Rossman, L., Huber, W. (2015). Storm Water Management Model Reference Manual Volume I: US EPA Office of Research and Development, Washington, DC. Available at: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=309346.

11. Pitt, R. E., Clark, S. E., Eppakayala, V. K., Sileshi, R. (2016). Don’t throw the baby out with the bathwater: sample collection and processing issues associated with particulate solids in stormwater. Journal of Water management and Modeling, 1–13. doi: 10.14796/JWMM.C416

12. Petrucci, G., Bonhomme, C. (2014). The dilemma of spatial representation for urban hydrology semi-distributed modelling: trade-offs among complexity, calibration, and geographical data. Journal of Hydrology, 1–53. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.06.019

13. Mercado, J. M. R., Maniquiz-Redillas, M. C., Kim L. H. (2015). Laboratory study on the clogging potential of a hybrid best management practice. Desalination Water Treat, 3127–3133. doi: 10.1080/19443994.2014.922287

14. Kandra, H. S., McCarthe, D., Fletcher, T. D., Deletic, A. (2014) Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment. Journal of. Hydrology, 1–10. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009

15. Segismundo, E. Q., Koo, B. H., Lee, B. (2016). Effects of Media Breakage on Infiltration Characteristics in Stormwater Management System. Journal of the Korean Geotechnical Society, 31–41. doi: 10.7843/kgs.2016.32.2.31

16. Segismundo, E. Q., Kim, L. H., Jeong, S. M., Lee, B. S. (2017). A Laboratory Study on the Filtration and Clogging of the Sand-Bottom Ash Mixture for Stormwater Infiltration Filter Media. Water, 32. doi: 10.3390/w9010032

17. Segismundo, E. Q. (2016). Experimental Analysis of Particle Breakage and Clogging Potential for Granular Filter Media Used in Stormwater Management Systems. Master's thesis, 1–10. Available at: https://hal.science/hal-03296735/document

18. Mercado J. M. R., Maniquiz-Redillas M. C., Kim L. H. (2017) Assessment and development of design criteria for a hybrid stormwater treatment system. Desalination and Water Treatment, 418–424. doi: 10.5004/dwt.2017.11447

19. Kandra, H. S., Deletic, A., McCarthy, D. (2014) Assessment of Impact of Filter Design Variables on Clogging in Stormwater Filters. Water Resources Management, 1873–1885. doi: 10.1007/s11269-014-0573-7

20. Lee B., Kim L.H., Jeon P.G., Segismundo E. (2014). Modeling of Suspended Solid Clogging of Porous Media in Urban Stormwater Infiltration Facility. Journal Korean Society, 427–437. doi: 10.9798/KOSHAM.2014.14.6.427.

21. Minnesota council. (2016). Operation and maintenance of infiltration trench. In Minnesota. Stormwater manual, Minnesota: MC. Available at: https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php/Operation_and_maintenance_of_stormwater_infiltration_practices

22. El Mansouri, B. (2015). Enhancement of groundwater potential by aquifer artificial recharge techniques. Climate change, 155–156. doi: 10.5194/piahs-366-155-2015

23. Sadiki, M. L. (2019). Improvement of groundwater resources potential by artificial recharge technique: a case study of charf el Akab aquifer in the Tangier region. Journal of Groundwater Science and Engineering, 7(3), 224–236. doi: 10.19637/j.cnki.2305-7068.2019.03.003

24. El Mezouary, L. (2020). Coupling of numerical flow model with the Susceptibility Index method to assess the groundwater vulnerability to pollution. Water Resources, 1–5. doi: 10.1145/3399205.3399246

25. El Mezouary, L. (2015). Modélisation numérique de la variation saisonnière de la qualité des eaux souterraines de l'aquifère. Magra Italie, 25–31. doi: 10.1051/lhb/20150015

26. Marla, C. M, So-Young, L., Lee Hyung, K. (2014). Long-Term Monitoring of Infiltration Trench for Nonpoint Source Pollution Control. Water Air Soil Pollution, (212), 13-26. Available at: https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjtlaadkozje))/reference/referencespapers?referenceid=1347469

27. Kandra, H. S., McCarthy, D., Fletcher, T. D., Deletic, A. (2014). Assessment of Clogging Phenomena in Granular Filter Media used for Stormwater Treatment, Journal

of Hydrology, 518–527. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.03.009.

28. Yong, C. F., McCarthy, D. T., Deletic, A. (2013). Predicting Physical Clogging of Porous Permeable Pavements, Journal of Hydrology, 48–55. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.12.009

29. Atlabachew, A., Shu, L., Wu, P., Zhang, Y., Xu, Y. (2018) Numerical modeling of solute transport in a sand tankphysical model under varying hydraulic gradient and hydrological stresses. Hydrogeololgy Journal, 2089–2113. doi: 10.1007/s10040-018-1758-6

30. Matsak, A. O. (2021). Improving the level of environmental safety of water bodies by reducing the impact of rainwater from urbanized territories (diss. cand. tech. science). Ukrainian Scientific Research Institution of Ecological Problems, Kharkiv, Ukraine. Available at: https://uacademic.info/ua/document/0421U100725

31. Rybalova, O. V., Matsak, A. O. (2018) Natural methods of surface runoff treatment. Third International Conference of European Academy of Science, 85–86. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/8806/1/Natural%20methods%20of%20surface%20runoff%20treatment.pdf

32. Matsak, A. O. Tsytlishvili, K. O. (2018). Using different filter media of stormwater treatment performace. Norwegian Journal of development of the International Science, 19-23. Available at: https://www.calameo.com/read/005798408dafeae98e9ba

33. Gorban, N. S., Zinchenko, I. V., Matsak, A. O. (2015). Improving the environmental safety of water bodies by using methods of preliminary treatment of stormwater. Problems of environmental protection and environmental safety, 87–90. Available at: http://www.niiep.kharkov.ua/node/2760

34. Solid fuel. Method of sieve particle size distribution: DSTU 4082-2002. (2006). Kyiv. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=75811

35. Methodology for measuring the mass concentration of suspended matter: RND 03-05-2002. (2002). Kharkiv. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0107508-04#Text

Надійшла до редколегії: 10.10.2024
Прийнята до друку: 16.11.2024

УДК 614.84

С. В. Рудаков, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8263-0476)*
О. В. Миргород, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-5989-3435)*
О. А. Петухова, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-4832-1255)*
О. В. Пирогов, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-0958-0801)*
Е. Е. Щолоков, *викл. (ORCID 0000-0002-9923-1487)*
Р. В. Корнієнко, *к.т.н., н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

РЕАЛІЗАЦІЯ БЕЗПЕКИ ПАСАЖИРІВ ПРИ ПОРУШЕННІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ САЛОНУ ЛІТАКА У ВИСОТНИХ ПОЛЬОТАХ

Вдосконалений комплекс технічних засобів колективного оповіщення про величини граничного резервного часу збереження свідомості пасажирів при порушення герметичності салону літака внаслідок виникнення надзвичайної ситуації під час висотного польоту. Досліджено статистичні дані щодо виникнення надзвичайних ситуацій на пасажирських літаках, які свідчать про необхідність розробки засобів реалізації безпеки пасажирів літаків цивільної авіації при виникненні нештатних ситуації. Одним з таких є комплекс технічних засобів колективного оповіщення пасажирів про величини граничного резервного часу збереження свідомості при надзвичайних ситуаціях у висотних польотах. Вирішувалась проблема реалізації безпеки пасажирів повітряних суден шляхом виявлення та усунення деяких розбіжностей між можливостями оповіщення пасажирів та відсутністю системи технічних засобів, які дозволяють реалізувати таке оповіщення. Розглянуто математичний підхід до побудови інтегральних показників небезпеки надзвичайних ситуацій висотного польоту, який дозволив обґрунтувати необхідність розвитку технологій моніторингу обстановки в салоні літаку для своєчасного розпізнавання потенційно небезпечних ситуацій, обумовлених зниженням барометричний тиску. Вирішене наукове завдання дослідження, яке включає в себе розробку системи науково обґрунтованих технічних рішень оповіщення пасажирів повітряних суден при порушення герметичності салону. Особливостями та відмінними рисами отриманих результатів, стала розробка алгоритму ризикометрії безпеки висотних польотів , що базуються на людському факторі з подальшим впровадженням у комплекс технічних засобів для реалізації безпечного середовища Представлена оцінка безпеки пасажирів, розрахована в реальному часі спираючись на первинні показники, що доступні для реєстрації впродовж всього польоту (також, в умовах порушення герметичності салону). Практичне застосування отриманих результатів може використовуватися в авіаційній сфері в разі виникнення надзвичайної ситуації.

Ключові слова: резервний час, метод регресійного аналізу, комплекс засобів опвіщення пасажирів, гіпоксія

1. Вступ

До чинників, що впливають на виникнення авіаційних катастроф належать: технічні несправності, людський фактор, терористичні акти, несприятливі погодні умови, та інші причини. Основною причиною авіаційних катастроф є негативний вплив людського фактору, що становить 46 % випадків. Найчастіше помилки допускає капітан повітряного судна, також аварії можуть бути спричинені неправильними діями інших членів екіпажу. Окрім того важливим чинником, що діє на безпеку польотів, є несприятливі погодні умови. Стан засобів захисту екіпажу та пасажирів повітряних суден при виникненні порушення герметичності салону літака показав необхідність проведення наукових досліджень в напрямку реалізації безпеки пасажирів ПС під час висотного польоту стосовно забезпечення оповіщення про можливу небезпеку в режимі реального часу. Практичне застосування результатів досліджень, щодо розробленого системи науково обґрунтованих технічних рішень оповіщення пасажирів ПС в НС висотного польоту дозволять розробити

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

алгоритм ризикометрії безпеки висотних польотів за людським фактором з наступною реалізацією в комплексі технічних засобів реалізації безпеки пасажирів. Це дозволить підвищити рівень безпеки пасажирів при виникненні НС в польоті.

Отже, питання реалізації безпеки пасажирів ПС шляхом вдосконалення технічних засобів оповіщення при виникненні надзвичайної ситуації на борту літака є актуальною.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В роботах [1–3] проведений аналіз вітчизняного і зарубіжного досвіду реалізації безпеки висотних польотів, який свідчить про відсутності єдиних підходів до ризикометрії втрати свідомості членами екіпажу та пасажирами ПС при порушення герметичності салону і кабіни літака. Проте без рішення залишилися питання, що суміжні з контролем часу збереження свідомості пасажирами повітряного судна при порушення герметичності салону. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з недосконалим парком вимірювальних приладів, які забезпечують відповідний контроль. Спосіб вирішення наявної проблеми є інтеграція дієвих систем моніторингу за реалізацією безпеки польотів. Визначено, що головна причина авіаційних катастроф – вплив людського фактору (46 %). Переважно трагічну помилку допускає капітан літака [4], проте причиною аварії можуть бути хибні дії решти членів екіпажу. Також до цієї категорії належать і хибні дії персоналу наземних служб. Способом вирішення наявної проблеми може бути використання нових засобів оповіщення пасажирів про виникнення НС. Власне дана стратегія використана в роботах [5–6].

В роботах [7–8] запропонована система технічних засобів індивідуального оповіщення пасажирів при НС, яка вимагає застосування кисневих масок. Відомості про час застосування масок масок та кількість резервного часу збереження свідомості пасажирами літака відображається на авіаційних кріслах. Проте, проведена експертна оцінка ефективності використання засобів індивідуального оповіщення пасажирів не показала задовільного результату.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є розробка та впровадження засобів колективного оповіщення пасажирів. Отже проведений аналіз дозволяє стверджувати, що виправданим є проведення дослідження, в напрямку цієї проблеми.

3. Мета та завдання дослідження.

Метою роботи є підвищення безпеки пасажирів літаків при виникненні надзвичайної ситуацій під час висотного польоту шляхом використання системи технічних засобів оповіщення пасажирів.

Для реалізації представленої задачі необхідно вирішення таких завдань:

- аргументувати необхідність оповіщення пасажирів щодо настання надзвичайної ситуації в польоті;

- аргументувати та дослідити алгоритми розрахунку оцінок резервного часу збереження свідомості пасажирами повітряного судна при порушення герметичності салону;

- створити технічні засоби колективного оповіщення пасажирів повітряного судна щодо потенційної небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій під час висотного польоту.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є організація безпеки пасажирів повітряних суден (ПС) при порушення герметичності салону.

Предметом дослідження є удосконалення методики оцінки професійних ризиків. Гіпотезою дослідження є конфлікти характеристик залежності мінімального, середнього та максимального резервного часу збереження свідомості при перебуванні людини на різній висоті.

Дослідження проведено базуючись на розробці моделі розрахунку оцінки резервного часу збереження свідомості пасажирами літака в разі виникнення надзвичайною ситуації під час висотного польоту.

Для аналізу даних були застосовані статистична обробка експериментальних даних, математичне моделювання, методи регресійного аналізу.

Застосовані методи ризикометрії безпеки висотних польотів в якості оцінки інтегральних показників безпеки життєдіяльності людини. В роботі використана узагальнена модель ефективності застосування технічних засобів колективного оповіщення пасажирів при виникненні НС, яка описана вербальними ознаками.

5. Математичний підхід до синтезу інтегральних показників небезпеки висотного польоту

Основними факторами зовнішнього середовища, які впливають на людину в висотному польоті: знижений парціальний тиск кисню, перепади атмосферного тиску, сонячна радіація, низька температура повітря,.

Крім вище перелічених факторів зовнішньої середи пілоти і пасажири, безумовно, піддаються ще впливу таких перевантажень, як вібрації, шумів, прискорення, відносної ізоляція від зовнішнього світу, але саме зниження парціального тиску і, як наслідок, поява стану гіпоксії є одним із найбільш значущих факторів ризику загибелі людей при появі НС під час висотного польоту.

В якості інтегральних показників безпеки життєдіяльності людини в умовах гіпоксії, які характеризують ризики для життя і здоров’я людини в екстремальних умовах, пов'язаних з зниженим змістом кисню в повітряному середовищі використовують величини резервного часу збереження свідомості, резервного часу збереження працездатності, ймовірності відповідних подій (збереження свідомості і збереження працездатності), а також ймовірності протилежних подій (втрати працездатності та втрати свідомості). З математичної точки зору ці величини є взаємопов'язаними, а методи їх розрахунку можливо розділити на наступні класи:

– за величиною вмісту кисню в трахеальному повітрі. Цей підхід дозволяє отримати адекватні оцінки інтегральних показників безпеки у висотному польоті, проте пряма реєстрація змісту кисню в повітрі технічно складна, а численні залежності величини цього показника від висоти польоту не дозволяють адекватно оцінити реальну обстановку в салоні літака в режимі розвитку НС;

– на підставі математичних моделей газообміну. Недоліком цього підходу є велика обчислювальна складність (кількість її елементів становить кілька сотень тисяч) і велика кількість припущень і ідеалізацій;

– за величиною барометричного тиску в салоні з наступним перерахунком в величину змісту кисню в повітряному середовищі на основі принципу еквівалентних висот Цей підхід технічно просто реалізується (датчики барометричного тиску в навколишньому повітрі компактні та не дорогі) та при частому зйомі показань з датчиків дозволяє реалізувати моніторинг потенційною небезпеки виникнення НС в висотному польоті в режимі реального часу.

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

В інтересах реалізації оповіщення пасажирів ПС про можливу небезпеку навколишньої ситуації доцільно використовувати величини резервного часу збереження свідомості, оскільки величини барометричного тиску, змісту кисню в навколишньому повітрі є малоінформативними для більшості пасажирів.

Оцінки ризику (ймовірності) втрати працездатності можуть викликати напади паніки у деяких «вразливих» пасажирів, які не зможуть адекватно оцінити ці величини в разі появи НС.

Внаслідок цього для вирішення завдань дослідження доцільно розраховувати оцінки резервного часу збереження свідомості під час висотного польоту за величиною барометричного тиску в салоні ПС. Рівень науково-технічного прогресу дозволяє реалізувати ризикометрію безпеки висотних польотів з врахуванням оцінки резервного часу збереження свідомості пасажирами ПС в реальному часі у разі розвитку НС під час висотного польоту на підставі безперервного (з заданою частотою дискретизації) визначення величини барометричного тиску в салоні літака.

Безпека пасажирів й екіпажу в умовах гіпоксії реалізується шляхом встановлення кисневого обладнання. Кисневе обладнання на борту ПС призначене виконувати наступні функції [9]:

− живлення киснем членів екіпажу, пасажирів ПС при аварійної порушення герметичності кабіни та салону;

− захист органів дихання членів екіпажу та бортпровідників від диму і токсичних газів, виділених при горінні матеріалів обладнання на літаку.

Проведений аналіз дозволив виділити наступні вимоги, які висуваються до кисневого обладнання:

1. Повна автоматизація всіх процесів подачі кисню.

2. У зв'язку з великою окислювальної здатністю всі деталі кисневих приладів повинні виготовлятися з матеріалів: корозійно-стійкої сталі, латуні, пластмас і прогумованою тканини.

3. Киснева система і її агрегати повинні бути працездатні при впливі вібрації, механічних ударів, зміні тиску повітря, температури, вологості і т.і.

4. Стаціонарні джерела кисню повинні мати пристрої для аварійного скидання кисню за борт в випадку небезпечного підвищення тиску в них.

5. Киснева система і агрегати, що входять до неї, повинні мати мінімально можливі габаритні та масу.

Засоби захисту, що призначені на випадок порушення герметичності салону або кабіни, не дозволяють пасажирам й екіпажу використовувати інформацію про кількість резервного часу збереження свідомості, що спричиняє паніку та надмірну нервозність при утворенні НС .

Отже, для побудови системи технічних засобів оповіщення пасажирів ПС у НС під час висотних польотів необхідно оцінити безпеку пасажирів, розраховану в реальному часу на основі базових показників, відкритих для реєстрації впродовж всього польоту (у тому числі, в умовах НС).

Завдання синтезу інтегральних показників безпеки висотних польотів зводиться до знаходження математичного виразу, який описує залежність залежною змінної у (інтегральний показник безпеки) від незалежних змінних хі(показники, що характеризують безпеку та доступні для реєстрації протягом всього польоту). Незалежні змінні об’єднані в вектор

$$X = \{x_i, i = 1...m\} \quad (1)$$

з розмірністю m, що дорівнює числу показників. Таке завдання найчастіше, і, як показує практика, ефективно вирішується методами регресійного аналізу

Розв'язання задачі регресійного аналізу передбачає перебування функціональною залежності

$$y = f(X) + \varepsilon, \varepsilon \to \min, \quad (2)$$

де ε – похибка, яку потрібно звести до мінімуму (зазвичай, ця похибка охарактеризована сумою квадратів регресійних залишків-різниць між наведеними в наборі даних і розрахованим значенням залежної змінної для заданих в вибірці значень незалежних змінних) [10].

За результатами регресійного аналізу визначається структура (вигляд: лінійна, експонентна, логарифмічна і тощо) та параметри (коефіцієнти рівняння, що забезпечують мінімальну величину помилки ε для моделі конкретної структури).

У зв’язку з тим, що для вирішення завдання досліджень не потрібно скорочення розмірності ознакового простору для синтезу залежності доцільно застосувати метод найменших квадратів (МНК).

МНК належить до класу підходів, у яких під час вирішення завдань відновлення залежності не вводиться припущень про випадковість шуканого вектора x та помилок вимірювань, і, отже, відсутня необхідність в залученні який-небудь додатковою інформації статистичного характеру [13].

Відмінна особливість МНК полягає в тому, що завдання синтезу алгоритму обчислення оцінки невідомого вектора x по вимірам y, заснована у виборі таких її значень, які забезпечують мінімізацію критерію, що характеризує міру близькості між виміряними і обчисленими значеннями залежною змінної.

Як простий, але ефективний варіант такого критерію в МНК використовується функція

$$Q(X) = (y - s(x))^T (y - s(x)) = \sum_{i=1}^{m} (y_i - s_i(x))^2. \quad (3)$$

Сумовані різниці називають нев’язками вимірювань, а підхід, заснований на мінімізації такого критерію називають МНК. Записаний критерій має цілком зрозумілий сенс – знайти вектор параметрів, при якому мінімізується сума нев'язок. Результати досліджень, отриманих в фізіології, свідчать про тому, що залежність інтегрального показника безпеки *y* від незалежних змінних x_i (показників, які характеризують безпеку пасажирів ПС і доступних для реєстрації протягом усього польоту) слід шукати у класі нелінійних функцій [10]. Слід відзначити, що поставлена задача відновлення залежності є одновимірною, тому етап структурної ідентифікації доцільно здійснювати по аналізу графіка «незалежна – залежна змінна». Доцільно визначити кілька структур залежностей та провести етапи параметричною адаптації. Параметрична адаптація залежності заданою структури здійснюється за відомими алгоритмів, заснованим на МНК.

Показниками якості суттєвості та адекватності отриманої залежності, що визначаються після параметричної адаптації, є [10]:

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

1. Значення квадрата коефіцієнта множинної кореляції (коефіцієнт детермінації):

$$R^2 = \frac{1 - \sum\left(y_i - y_i^*\right)^2}{\sum\left(y_1^* - \bar{y}_i\right)^2 + \sum\left(y_i - y_i^*\right)^2}, \quad (4)$$

де y_i^* – значення залежної змінної y, отримане за регресійною моделлю; y_i – значення залежної змінної y, задане апріорно (вихідні дані); $\bar{y}_i$ – середнє арифметичне залежної змінної y_i

Оцінка коефіцієнта детермінації (R^2) – це по суті частка дисперсії залежною змінної *y*, пояснювана аналізованої моделлю залежності $y = f(X)$, то є незалежними (що пояснюють) змінними x_i. Для лінійної регресії R^2 є квадратом множини коефіцієнта кореляції між залежною змінної y і незалежними змінними x.

2. Наведена незміщена оцінка коефіцієнта детермінації:

$$R^2_{SR} = \frac{(N-1)\times\sum\left(y_i - y_i^*\right)^2}{(N-n-1)\times\sum\left(y_1^* - \bar{y}_i\right)^2 + \sum\left(y_i - y_i^*\right)^2}, \quad (5)$$

де n – число незалежних змінних; N – число спостережень.

3. Стандартна помилка обчислень залежною змінної y:

$$\Delta_Y = \sqrt{\frac{\sum\left(y_i - y_i^*\right)^2}{N-n-1}}. \quad (6)$$

4. Значення статистики Фішера та рівень значущості для нульової гіпотези про рівності нулю коефіцієнта множинної кореляції.

5. Гістограма нормованих залишків-інформативна для перевірки гіпотези про наявність надмірних похибок, в випадку їх відсутності крапки гістограми розосереджені поступово.

6. Залежність регресійних залишків від експериментальних значень незалежною змінної – наявність тренду на графіку свідчить про те, що модель можна покращити, а наявність випадкового розкиду свідчить проти можливості покращення.

7. Графік нормованих залишків в залежності від номера об'єкта вибірки – служить для виявлення тренду, залежить від часу, і не враховується регресійною моделлю.

8. Критерій Дарбіна-Уотсона дозволяє перевірити припущення щодо незалежності послідовності помилок спостережень за значеннями статистики Дарбіна-Уотсона (DWS):

$$DWS = \frac{\sum_{i=2}^{N}\left(\left|y_i^* - y_i\right| - \left|y_{i-1}^* - y_{i-1}\right|\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(\left|y_i^* - y_i\right|\right)^2} \quad (7)$$

і наступному порівнянні обчисленого значення з табличним.

Показники 6-8 дозволяють перевірити гіпотези про лінійності, однорідності та незалежності помилок. Якщо вказані вимоги виконуються, то на графіку регресійної моделі не спостерігатиметься залежності між залишковими і регресійними значеннями, тобто, залежність буде представляти собою симетричне рівномірне розподілення. Також необхідно перевірити відповідність залишків нормальному закону розподілення.

Відомо, що для коректного рішення завдань відновлення залежності необхідно використовувати репрезентативні вибірки. Властивість репрезентативності вибірки означає рівномірність включення в неї об'єктів різних типів (на всьому діапазоні зміни незалежною і залежною змінних).

При вирішенні завдань відновлення залежностей, визначають показники якості одержаної залежності. Причому коректнішим (об'єктивним) є розбиття вихідний вибірки на навчальну і контрольну (екзаменаційну): відновлення залежностей проводити на навчальній вибірці, а визначення показників якості синтезованих залежностей проводити на прикладах (випадках), які увійшли в контрольну (екзаменаційну) вибірку.

Для підвищення репрезентативності вибірки при вирішенні задачі відновлення залежності використовуємо наступний алгоритм:

1. Вибірка апріорно заданому співвідношенні (зазвичай 60/40), випадковим чином поділяється на навчальну і контрольну.

2. Побудовані залежності тестуються на контрольній вибірці: якщо помилки, допустимі декількома моделями, відбуваються на одних і тих ж прикладах, то здійснюється перехід до наступного кроку алгоритму, в протилежному випадку – робота алгоритму завершується.

3. Об'єкти контрольної вибірки, на яких допускається велика кількість помилок, переносяться в навчальну вибірку, а з навчальною вибірки в контрольну переноситься така ж кількість випадково обраних об'єктів.

Кроки 2 і 3 виконують до тих пір, поки при тестуванні побудованих регресій не будуть виключені помилки на тих самих приклади.

Дивлячись на те що наведений алгоритм не має точного теоретичного обґрунтування, отриманий досвід його застосування свідчить про збільшення частки правильних рішень на контрольних вибірках на 5–15 % їх загальної кількості, що узгоджується з поставленою задачею.

6. Оцінка резервного часу збереження свідомості пасажирами при виникненні надзвичайною ситуації

Мінімальні і максимальні величини резервного часу збереження свідомості неадаптованих до гіпоксії осіб (якими є пасажири ПС) при знаходженні їх на критичних висотах визначено, починаючи з висоти 7000 м і вище, при диханні навколишнім повітрям, а також на висотах понад 13 500 – 14000 м при диханні чистим киснем [11]. На менших висотах зберігаються потенційні можливості організму по реалізації мінімально необхідної кількості кисню з легень до життєво важливим органам, а ступінь зниження парціального тиску кисню в тканинах не досягає критичних величин, несумісних з життям [11].

Парціальне тиск кисню в трахеї пов'язаний з барометричним тиском залежністю [11]:

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

$$p^0 = F\left(P_h - P_{H_2O}\right), \quad (8)$$

де F – концентрація кисню в атмосфері (F=0,2093), P_h – барометричний тиск на висоті h.

У реальних умовах параметри атмосфери схильні до помітного відхиленням від середніх значень (сезонним, добовим, метеорологічним і ін). Для реалізації порівнянності результатів, отриманих в різних конкретних ситуаціях, в Україні та за кордоном використовується стандартна атмосфера. Як константа в неї прийняті (крім уже згаданих): T_0 = 288 К (t_0 = 15 °С) ; p_0 = 101 325 Па (760) мм рт. ст.); $h_{0ст}$ = 11000 м; $T_{0ст}$ = 216,5 К ($t_{0ст}$ = –56,5 ° С); $p_{0ст}$ = 22 690 Па (170 мм. рт. ст.).

У висотний фізіології отримані емпіричні дані, визначальні мінімальні, середні та максимальні резервні часи збереження свідомості при перебування людини на різних висотах (різному барометричному тиску), усереднені значення яких відображені на рис. 1.

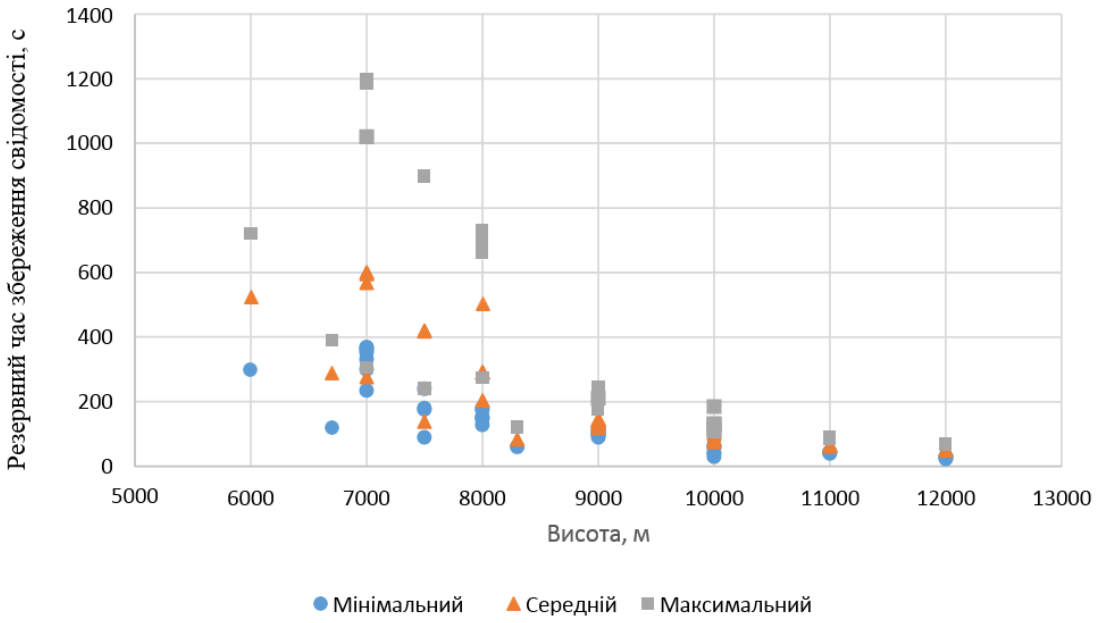


Рис. 1. Значення мінімального, середнього та максимального резервного часу збереження свідомості людини для різних висот

Аналіз залежності мінімального, середнього і максимального часу збереження свідомості від висоти (рис.1) дозволяє зробити висновок про те, що структура залежності резервного часу збереження свідомості від висоти має вигляд поліноміальної, експонентної залежності або зворотньої функції (Y = 1 / x).

Параметричну адаптацію для кожною структури залежності та розрахунок показників суттєвості та адекватності кожної отриманої залежності проводили у пакеті програм статистичного аналізу Statistika ver. 10.0.

Результати параметричною адаптації (отримані оцінки коефіцієнта детермінації моделей) представлені на рис. 2.

Аналіз результатів показує, що найбільш істотна (з максимальним коефіцієнтом детермінації, рівним 0,84) залежність резервного часу збереження свідомос-

ті (Т) від висоти польоту знайдено в класі статечних функцій (рис. 3):

$$T = 7 \times 10^{-21p4,8429} - 11. \quad (8)$$

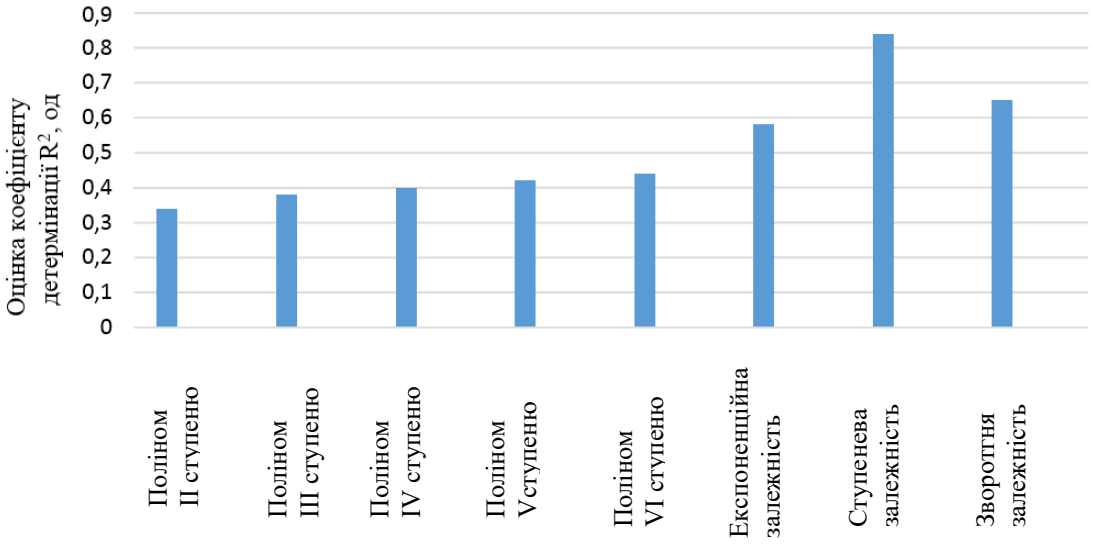


Рис. 2. Оцінки коефіцієнтів детермінації моделей

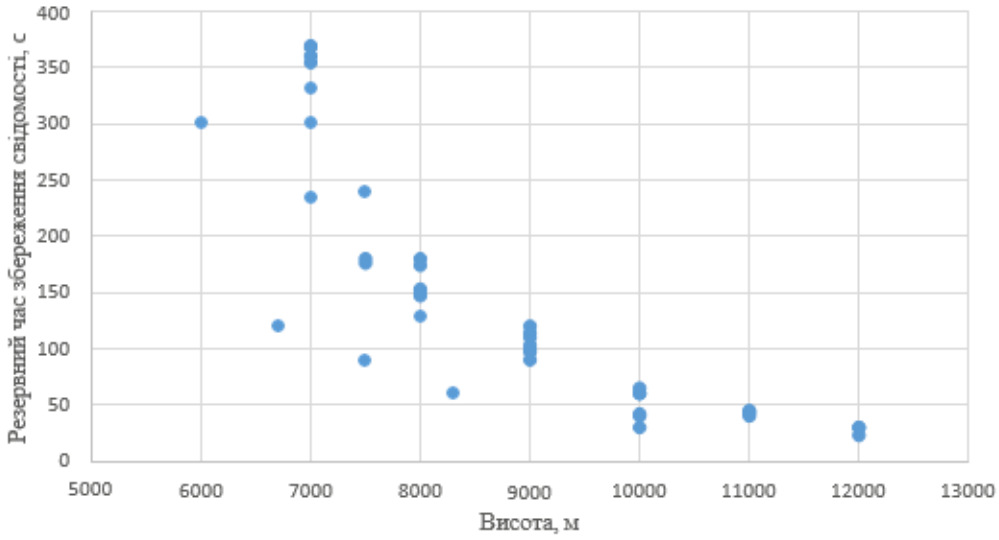


Рис. 3. Залежність резервного часу збереження свідомості від висоти

Результати показників якості отриманої залежності свідчать про її адекватність: значення квадрата коефіцієнта множинної кореляції R^2 =0,84; наведена незміщена оцінка коефіцієнта детермінації R^2 =0,79; стандартна помилка обчислень залежної змінної y: 34 с; нульова гіпотеза про рівності нулю коефіцієнт амножинної кореляції відкидається(p > 0,05); аналіз гістограми нормованих залишків свідчить про рівномірності розподілу точок, тобто про відсутності надмірних похибок; аналіз залежності регресійних залишків від експериментальних значень незалежною змінної показує відсутність тренда на графіку; аналіз графіка нормованих залишків залежно від номера об'єкта свідчить про відсутності тренда, залежить від часу,і не врахованого моделлю; величина критерію Дарбіна-Уотсона DWS = 2,4 свідчить про незалежності послідовності помилок спостережень (відсутність автокореляції).

Таким чином, для рішення завдання визначення залежності величини резер-

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

вного часу збереження свідомості від висоти польоту ПС обраний один з методів регресійного аналізу – МНК. За допомогою емпіричних даних, та МНК була синтезована статична функція Т, яка дозволяє розрахувати оцінки резервного часу збереження свідомості пасажирів ПС в залежності від висоти польоту з якістю, достатньою для оповіщення пасажирів ПС про небезпеки НС висотного польоту.

7. Розробка засобів оповіщення про величину граничного резервного часу збереження свідомості

Система призначена для оповіщення пасажирів і екіпажу ПС про величину граничного резервного часу збереження свідомості в випадку порушення герметичності салону.

Засоби колективного оповіщення – засоби, що надають своєчасну інформацію для пасажирів, котрі перебувають в літаку.

В умовах порушення герметичності салону автоматично або примусово із контейнерів над сидіннями пасажирів випадають кисневі маски (КМ), які підключені до системи кисневого живлення. Пасажир повинен підтягнути та надіти КМ. При цьому пасажиру не відомо, яке газове середовище знаходиться навколо, що значно зменшує шанси на дійсну оцінку небезпеки життю і спричиняє надмірну нервозність і паніку. Схожі випадки відбувають в інших ситуаціях, що виникають при перебуванні людини в умовах гіпоксії.

Для реалізації безпеки людини в небезпечних (нештатних) ситуаціях, пов'язаних з впливом гіпоксії, наприклад, при відмові кисневого обладнання, порушенні герметичності салону (кабіни), пропонується використовувати індикатор резервного часу збереження свідомості. Загальний вигляд індикатора резервного часу представлений на рис. 4 [12].

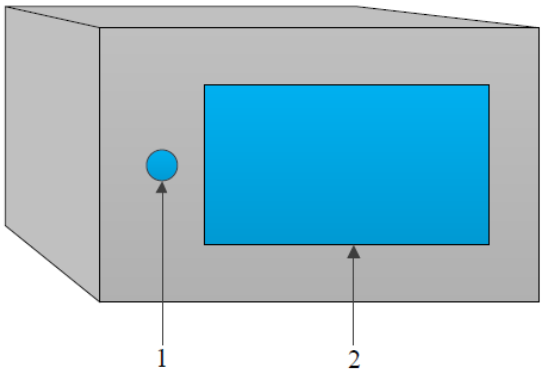


Рис. 4. Загальний вигляд індикатору резервного часу

Пропонований індикатор має корпус, в який інтегровано датчик барометричного тиску (1) та екран (2) для відображення резервного часу збереження свідомості людини. Датчик барометричного тиску індикатора під’єднано до банку даних (4), що підключений до обчислювача (5), котрий приєднаний до компаратору (6), який з’єднаний з екраном (2) і з блоком бездротового інтерфейсу (7) за допомогою шини (8) (рис.5).

Функціонування індикатора резервного часу збереження свідомості людиною в умовах гіпоксії полягає в наступному:

1. Індикатор кріпиться і розміщується так, щоб інформацію яку він відображає бачили якнайбільша кількість людей, окрім того датчик барометричного тиску навколишнього газового середовища необхідно закріпити так щоб інші пред-

мети не могли викривляти вимірювані дані барометричного тиску.

2. При активації індикатора відбувається реєстрація показників з датчика барометричного тиску з частотою 1 Гц (1 раз на секунду), в той же час акумулятор автоматично заряджається від мережі електроживлення через роз'єм сполучення, а складові індикатора запитані через загальну шину електроживлення.

3. Значення барометричного тиску в навколишньому середовищі з датчика по інформаційно-керівній шині надходять:

–в накопичувач інформації, який представляє з себе зсувний регістр із 300 осередків. Тобто в накопичувачі одночасно може зберігатися не більше 300 вимірювань барометричного тиску (що відповідає вимірюванням кожної секунду впродовж 5 хвилин) – 301 вимірювання записується замість першого, 302 вимірювання – замість другого і так далі;

– модуль бездротового інтерфейсу для передачі на робоче місце екіпажу і на робоче місце фахівців наземних служб.

4. В обчислювачі відбувається динамічний розрахунок оцінки резервного часу збереження свідомості людини T, с, за формулою (9).

5. Розрахована оцінка резервного часу збереження свідомості надходить в компаратор, де вона зіставляється з періодом в 300 с. У випадку, коли кількість резервного часу збереження свідомості менше 300 с, посилається сигнал на активацію екрану. У екрані індикатора відображається оцінка резервного часу збереження свідомості людини, котра визначається в реальному часі з періодичністю, що дорівнює частоті вимірювання барометричного тиску в навколишньому середовищі (1 Гц).

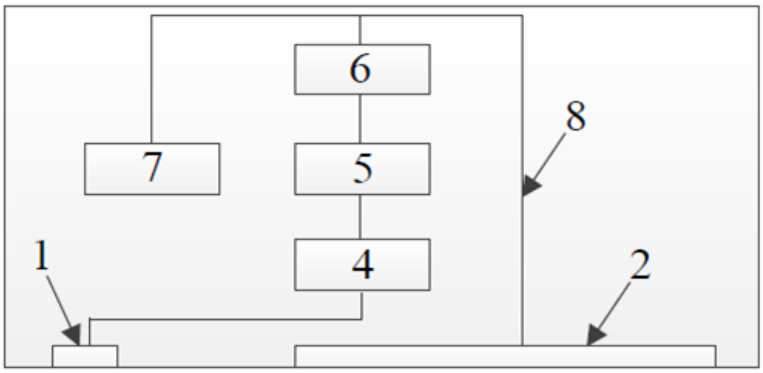


Рис. 5. Структурна схема індикатора резервного часу

З такою ж періодичністю розрахована оцінка резервного часу збереження свідомості людини передається в модуль бездротового інтерфейсу для передачі на робоче місце екіпажу та на робоче місце спеціалістів наземних диспетчерських служб. Якщо при увімкненому екрані індикатора розрахована оцінка резервного часу збереження свідомості стає більшою або рівною 300 с, видається сигнал на вимкнення екрану індикатора. Як варіант, для більш раціонального використання індикатора в випадку резервного часу більше 300 с. можливо виводити на екран астрономічний час або поточну висоту польоту.

Для вирішення питання використання в індикаторі резервного часу збереження свідомості проаналізовано можливість застосування наступних датчиків барометричного тиску:

• CAREL SPKT0031D0. Інтервал тиску, що вимірюється – 0…3 МПа; габаритні розміри – діаметр – 21 мм, довжина – 51 мм, напруга живлення – 10...36 В; робоча температура –25 °С...80 °С; похибка вимірювань – 4 %; матеріал виготов-

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

лення – сталь [14];

ДІР-23. Інтервал тиску, що вимірюється – –0,1…2,4МПа; габаритні розміри – діаметр –30 мм; довжина – 101 мм, напруга живлення – 8...8 В; робоча температура –40 °С...100 °С; похибка вимірювань – 0,5%; матеріал виготовлення – сталь [15].

Як накопичувачі інформації проаналізовано можливість використання наступних мікросхем:

М25Р16-VMN6TP. Об `єм пам'яті – 16 Мбіт; тактова частота – 75 МГц; напруга живлення – 2,7…3,6 В; робочий температурний діапазон – 40 °С...85 °С; вага – 0,2 г [16];

23К256-I/SN. Об `єм пам'яті – 256 Кбіт; тактова частота – 20 МГц; напруга живлення – 2,7…3,6 В; робочий температурний діапазон –40 °С ... 85 °С; вага – 0,15 г [14].

Для застосування в якості компаратора використані:

- LM193DR. Кількість каналів – 2; час затримки – 1300 мс; напруга живлення: 2…36 В; робочий температурний діапазон – 55 °С...125 °С; вага – 0,15 г [15];
- LM2903DR. Кількість каналів – 2; час затримки – 300 мс; напруга живлення – 36 В; робочий температурний діапазон –40 °С...125 °С; вага – 0,15 г [15].

Щодо до використанню в якості обчислювача (мікропроцесора) досліджено характеристики:

ADM707ANZ. Порогова напруга – 4,65 В, робочий температурний діапазон – 40 °С...85 °С; вага – 1 г [16];

MAX813LESA+.Порогова напруга –4,65 В, робочий температурний діапазон –40 С...85 °С; вага – 0,15 г [16].

Величина резервного часу збереження свідомості буде відображатися на монітори (цифровому табло) і з допомогою багаторежимного світлодіоду. Тому вибираючи модель перерахованих компонентів потрібно виходити з того, наскільки буде зручно пасажиру в умовах надзвичайної ситуації сприймати інформацію про величину резервного часу. У цьому аспекті проаналізовано наступні варіанти:

- інформаційне табло GHM MIGAN. Фронтальні розміри – 571×2047 мм; напруга живлення – 24 В; висота червоних світлодіодних сегментів – до 150 мм; робочий температурний діапазон – 0°С … 50°С ; клас захисту – IP65 [17];
- індикатор CA56-12SRWA. Фронтальні розміри – 50×19 мм; робітник температурний діапазон – –40 °С…85 °С; висота червоних світлодіодних сегментів – 14,2 мм; напруга живлення – до 6 В; вага – 8,5 г [17];
- монітор NL6448BC20-21D. Діагональ – 17 см; Розширення – 640×480; живлення – 3,3 В; робочий температурний діапазон – –20 °С…70 °С [17].

Корпус індикатора резервного часу має бути виконаний в захищеному виконанні: бути абсолютно захищений від проникнення мікрочастинок і пилу, а за ступенем стійкості та проникненню рідини він повинен бути мінімум захищений від струменів води під низьким тиском в продовж 3 хв. Корпус індикатора та елементна база виконуються з новітніх та надійних матеріалів, котрі дозволять забезпечити мінімальні масові та габаритні показники і потрібну міцність для підтримання робочих функцій в умовах перевантажень при перельотах.

Параметри екрану цифрового індикатора визначалися залежно від розміщення в салоні ПС, показання цифрового індикатора повинні бачити всі пасажири.

Місткість акумулятора повинна забезпечувати функціонування індикатора впродовж восьми годин після відключення від мережі електроживлення.

Відповідно до викладених вимог запропонований макетний зразок індикатора (рис.6).

Рис. 6. Макетний зразок індикатора резервного часу

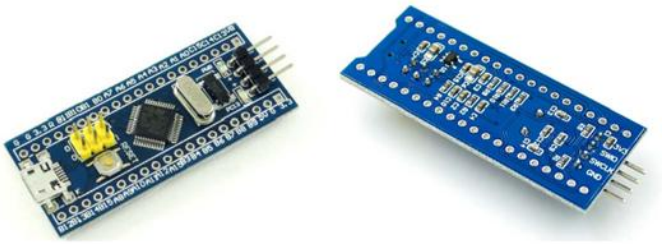


Рис. 7. Налагоджувальна плата, використана для побудови індикатора резервного часу збереження свідомості людини

Під час виготовлення макетного зразка індикатора використана налагоджувальна плата чіп CKS STM32 CKS32F103C8T6, на якої скомпоновані складові частини індикатора (рис. 7).

Дослідження варіантів розташування індикатора резервного часу збереження свідомості людини, зконструйованого відповідно до представленої типової схеми в різних форматах та компоновках, дозволяє визначити безліч можливих проблем.

Зокрема, розташування індикатора під світловим покажчиком «Вихід». Позитивною стороною такого розміщення є можливість живлення індикатора від дроту, який приєднаний до світлового покажчика, а також доступність для погляду. Наприклад, літак моделі Боїнг 737-400 має салон висотою 220 см, монітор NL6448BC20-21D має ширину – 11,8 см. Таким чином, індикатор резервного часу робиться виїжджаючим зі стельового простору салону з метою того, щоб за відсутності порушення герметичності салону, індикатор не зменшував простір від підлоги до стелі. Одним із можливих недоліків може бути погана видимість для пасажирів задніх рядів. Для усунення цього нестачі і для пасажирів, які мають проблеми із зором, можливо в блок індикації вбудувати динамік, через який буде доводиться інформація про значення резервного часу збереження свідомості. З 2002 р. заборонено куріння на всіх рейсах, тому, як варіант, можливо запропонувати вбудувати індикатор резервного часу замість індикації про заборону куріння. У будь-якому випадку навіть встановлення індикації через 1–2 ряди дозволить якісніше сповіщати про резервний час збереження свідомості. У кабіні екіпажу літака можливо розміщення індикатора (рис. 8). Індикатор резервного часу збереження свідомості показаний в стаціонарному варіанті. Крім того, необхідно передбачити можливість установки перемикача вибору значень резервного часу між кабіною екіпажу або салоном літака, в цілях того, щоб екіпаж мав більше повну інформацію щодо виникнення НС.

Місце розташування індикатора резервного часу збереження свідомості для колективного оповіщення пасажирів в салоні ПС обумовлене габаритами літака та видимістю для пасажирів чи екіпажу.

8. Обговорення результатів використання технічних засобів колективного оповіщення при виникненні надзвичайних ситуацій

Представлені результати пояснюються вдосконаленням технічних засобів колективного оповіщення пасажирів літака щодо потенційної небезпеки виникнення надзвичайних ситуацій висотного польоту. Реалізація технічних засобів колектив-

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

ного оповіщення пасажирів повітряних суден у надзвичайних ситуаціях під час висотного польоту відбувається за рахунок монтажу в салоні повітряного судна інформаційних екранів з вбудованими звуковими чи цифровими індикаторами небезпеки, що базуються на величині резервного часу збереження свідомості пасажирами повітряного судна, та розраховується в реальному часу за величиною барометричного тиску в салоні літака. Особливими рисами запропонованого методу є визначення залежності величини резервного часу збереження свідомості від висоти польоту ПС за допомогою методу регресійного аналізу – методу найменших квадратів, особливість якого полягає в тому, що завдання синтезу алгоритму обчислення оцінки значень часу забезпечує мінімізацію критерію, який характеризує міру близькості між виміряними і обчисленими значеннями залежною змінної.

Рис. 8. Варіант розміщення індикатора резервного часу збереження свідомості людини в кабіні екіпажу літака Boeing 737

Недоліком даного досліду є відсутність можливості проведення натурних випробувань, які б могли підтвердити результати математичних розрахунків.

Ключовими векторами вдосконалення комплексу технічних засобів оповіщення пасажирів літаків в надзвичайних ситуаціях під час висотного польоту є реалізація проведення реєстрації персональних характеристик організму пасажирів (тренованість до переносимості кисневого голодування, наявність хронічних захворювань антропометричні дані,) з метою вдосконалення планування та проведення рятувальних заходів.

Наступним можливим напрямком розвитку комплексу є застосування більш досконалого математичного апарату для розрахунку резервного часу збереження свідомості та використання більш сучасної елементної бази реалізації відповідних пристроїв.

9. Висновки

1. Проведений аналіз методів дозволив аргументувати застосування в якості базового математичного підходу до синтезу інтегральних показників небезпеки порушення герметичності салону літака в умовах висотного польоту метод регресійного аналізу. Модель розрахунку оцінки резервного часу збереження свідомості пасажирами повітряного судна при порушенні герметичності салону, що отримана в результаті нелінійного регресійного аналізу, дозволила провести розрахунок оцінки резервного часу з якістю, що задовольняє потреби безпеки пасажирів літака.

2. Розроблений алгоритм ризикометрії безпеки висотних польотів за людським фактором є методичною основою для застосування комплексу технічних засобів реалізації безпеки при виникненні надзвичайної ситуації під час висотних польотів.

3. Комплекс технічних засобів колективного оповіщення про величини граничного резервного часу збереження свідомості при порушенні герметичності салону літака в умовах польотів дозволяє провести у реальному часі оцінку величини резервного часу збереження свідомості пасажирами повітряного судна з відображенням інформації на табло колективного користування, встановлених в салоні, у цифровому вигляді або за допомогою кольорового кодування.

Література

1. Bugayko D., Shevchenko O. Indicators of air transport sustainable development. Intellectualization o f Logistics and Supply Chain Management. 2020. № 4. P. 6–18.

2. Analysis on water content of product gas in onboard oxygen generation system (OBOGS) / Dongsheng J. and oth. International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS): conference paper. IEEE. 2016. P. 340–345. doi: 10.1109 /AUS.2016.7748071

3. Balbi G., Moraglio M. Proposal to hybridise communication and mobility research agendas. In: S. Fari, M. Moraglio, eds. Peripheral flows: A Historical Perspective on Mobilities between Cores and Fringes. Newcastle: Cambridge Scholars Publishing. 2016. P. 10–27.

4. Safety Management Manual Doc 9859 URL: https://www.unitingaviation.com/publications/9859/

5. Groenenboom, J. Aircraft health monitoring. The True Value of Aircraft Health Monitoring and Data Management. Proceedings of the 13th Maintenance Cost Conference. Panama, September 13–15. 2017. P. 172 – 179.

6. Global Market Forecast. Future Journeys 2013 – 2020 AIRBUS S.A.S Blagnac Cedex: Art @ Caractere, 2013. 125 p. URL: http://www.airbus.com/company/market/forecast/?elD=damfrontend push@docID=33755

7. Рудаков С.В., Петухова О.А., Миргород О.В., Кулаков О.В. Ефективність технічних засобів інформування пасажирів повітряних суден при надзвичайних ситуаціях. Проблеми надзвичайних ситуацій. Х.: НУЦЗУ. 2022. Т.2 (36). С. 133–146. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17071

8. Adrian T., Crump R.K., Vogt E. Nonlinearity and flight-to-safety in the risk-return trade-off for stocks and bonds. The Journal of Finance. 2019. Vol. 74. № 4. P. 1931–1973

9. Executive Agreements Database, Statement Regarding the Supplement with The Denmark and Norway Under The Memorandum of Understanding Concerning the Cooperative Framework For System Development and Demonstration of the Joint Strike Fighter, with Annexes Signed At Washington May 28 and June 20, 2022 Entered Into Force June 20, 2022. doi: 10.7910/dvn/dpheue

10. Ministère de l’aménagement du territoire et de l’environnement (France) / International Handbook on Forest Fire Protection Technical guide for the countries of the Mediterranean basin, 2020. 149 p.

11. L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. Borona / Corrosion and behavior of HVOF cermet coating used to replace hard chromium.Electrochim. Acta 2020.49. P. 2803–2814.

12. Analysis on water content of product gas in onboard oxygen generation system (OBOGS) / Dongsheng J. and oth.International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS) : conference paper. IEEE. 2016. P. 340–345. doi: 10.1109 / AUS.2016.7748071

13. Зарубін А. М. Висотне обладнання літальних апаратів: навч. посібник. Харків: ХНУПС, 2015. 112 с.

14. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. April 2018.

 © С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

Shephard. 368 p.

15. NWCG (National Wildfire Coordinating Group) / Standards for Aerial Supervision, February, 2020. 120 p.

16. F. Zakharin, S. Ponomarenko. Unmanned Aeral Vehicle Integrated Navigation Complex with Adaptive Tuning / Proceedings of IEEE 4-th International Conference, Kyiv. 2017. P. 23–26.

17. Grishmanov E., A. Mogilatenko Yu Danilov. Development of information technology for automated forecasting of adverse aviation events in flight. Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers 1. 2019. № 53. P. 36–40. doi: 10.26906/sunz.2019.1.036

S. Rudakov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Myrgorod, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Petukhova, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department,*
O. Pirohov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
E. Shcholokov, *Lecturer of the Department*
R. Korniienko, *PhD, Senior Researcher, Researcher of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

ENSURING THE SAFETY OF PASSENGERS DURING THE DEPRESSURIZATION OF THE AIRCRAFT CABIN IN HIGH-ALTITUDE FLIGHTS

The work includes an improved complex of technical means of collective informing about the values of the maximum reserve time of consciousness preservation in emergency situations (ES) of high-altitude flights. Statistical data on the occurrence of emergency situations (ES) on passenger aircraft were studied, which indicate the need to develop means of ensuring the safety of passengers of civil aviation aircraft in the event of emergency situations.One such complex is a complex of technical means of collectively informing passengers about the values of the maximum reserve time of maintaining consciousness in emergency situations in high-altitude flights. The object of the study is the organization of the safety of aircraft passengers in the event of an emergency.The article addressed the problem of ensuring the safety of aircraft passengers by identifying and eliminating some discrepancies between the possibilities of informing passengers and the lack of a set of technical means that allow such information to be implemented.To eliminate such discrepancies, a mathematical approach to the synthesis of integral indicators of the danger of high-altitude flight emergencies was considered, which made it possible to substantiate the need for the development of technologies for monitoring the situation in the aircraft cabin for the timely recognition of potentially dangerous situations caused by a decrease in barometric pressure. The work solves the scientific task of the research, which includes the development of a set of scientifically based technical solutions for informing aircraft passengers in the event of a high-altitude flight emergency.The peculiarities and distinguishing features of the obtained results, thanks to which they allowed to solve the researched problem, was the development of the algorithm of riskometry of the safety of high-altitude flights based on the human factor, with the subsequent implementation in the complex of technical means of ensuring safety. In order to build a complex of technical means of notifying passengers in the emergency of high-altitude flights, passenger safety assessments are given, calculated in real time on the basis of primary indicators available for registration during the entire flight (including in the event of an emergency). The practical application of the obtained results can be used in the aviation field in the event of an emergency.

Keywords: method of regression analysis, reserve time, complex of means of informing passengers, hypoxia

References

1. Bugayko, D., Shevchenko, O. (2020). Indicators of air transport sustainable development. Intellectualization o f Logistics and Supply Chain Management, 4, 6–18.

2. Analysis on water content of product gas in onboard oxygen generation system (OBOGS) / Dongsheng J. and oth. (2016). International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS): conference paper. IEEE, 340–345. https://doi.org/10.1109/

AUS.2016.7748071

3. Balbi, G., Moraglio, M. (2016). A Proposal to hybridise communication and mobility research agendas. In: S. Fari, M. Moraglio, eds. Peripheral flows: A Historical Perspective on Mobilities between Cores and Fringes. Newcastle: Cambridge Scholars Publishing, 10–27.

4. Safety Management Manual Doc 9859. (2018). Available at: https://www.unitingaviation.com/publications/9859/

5. Groenenboom, J. (2017). Aircraft health monitoring. The True Value of Aircraft Health Monitoring and Data Management. Proceedings of the 13th Maintenance Cost Conference, 172–179.

6. Global Market Forecast. Future Journeys 2013–2020. (2013). AIRBUS S.A.S Blagnac Cedex: Art @ Caractere, 125. Available at: http://www.airbus.com/company/market/forecast/?elD=damfrontend push@docID=33755

7. Rudakov, S., Petuhova, O., Mirgorod, O., Kulakov, O. (2022). Efektivnist tehnihnih zasobiv informuvanna pasaziriv povitpanih suden pri nadzvihanih situasiah. Problemi nadzvihanih situasii. H.: NUSZU, 2(36), 133–146. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17071

8. Adrian, T., Crump, R. K., Vogt, E. (2019). Nonlinearity and flight-to-safety in the risk-return trade-off for stocks and bonds. The Journal of Finance, 74, 4, 1931–1973.

9. Executive Agreements Database, Statement Regarding the Supplement with The Denmark and Norway Under The Memorandum of Understanding Concerning the Cooperative Framework For System Development and Demonstration of the Joint Strike Fighter, with Annexes Signed At Washington May 28 and June 20, 2022. Entered Into Force June 20, 2022. doi: 10.7910/dvn/dpheue

10. Ministère de laménagement du territoire et de lenvironnement (France) / International Handbook on Forest Fire Protection Technical guide for the countries of the Mediterranean basin, 2020, 149.

11. L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. (2020). Borona. Corrosion and behavior of HVOF cermet coating used to replace hard chromium.Electrochim. Acta 2020, 49, 2803–2814.

12. Analysis on water content of product gas in onboard oxygen generation system (OBOGS) / Dongsheng J. and oth. (2016). International Conference on Aircraft Utility Systems (AUS): conference paper. IEEE, 340–345. doi: 10.1109/AUS.2016.7748071

13. Zarubin, F. (2015). Visotne obladnanna litalnyh aparativ, navs. posidnyk. Harkiv, HNUPS, 112.

14. Military Unmanned Systems. Annual Handbook. ISSUE 26. April 2018. Shephard, 368.

15. NWCG (National Wildfire Coordinating Group). (2020). Standards for Aerial Supervision, February, 120.

16. Zakharin, F., Ponomarenko, S. (2017). Unmanned Aeral Vehicle Integrated Navigation Complex with Adaptive Tuning/Proceedings of IEEE 4 th International Conference, Kyiv, 23–26.

17. Grishmanov, E., Mogilatenko,A., Danilov,Yu. (2019). Development of information technology for automated forecasting of adverse aviation events in flight. Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers, 1, 53, 36–40. doi: 10.26906/sunz.2019.1.036

Надійшла до редколегії: 07.10.2024
Прийнята до друку: 15.11.2024

© С. В. Рудаков, О. В. Миргород, О. А. Петухова, О. В. Пирогов та ін.

УДК 614.841.45

М. М. Несух*[1]*, *ст. викл. (ORCID 0000-0003-2561-110X)*
А. В. Субота*[1]*, *к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-8605-344X)*
А. В. Швиденко*[2]*, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7708-8595)*
О. В. Некора*[3]*, *к.т.н., с.н.с., провід. н. с. (ORCID 0000-0002-5202-3285)*
[1]*Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», Ужгород, Україна*
[2]*Черкаський державний бізнес-коледж, Черкаси, Україна*
[3]*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ВІДРИВІ РЕЗЕРВУАРА ВІД ДНИЩА ВНАСЛІДОК ПОЖЕЖІ

Досліджені закономірності зміни параметрів руху частини резервуара після відриву від днища у залежності від його конструктивних параметрів та умов його заповнення. На основі проведених досліджень сформовано математичну модель процесу відриву частини резервуара, яка враховує як геометричні, так і фізичні нелінійності матеріалу. Для обраного дослідження використано методи математичного моделювання, чисельного аналізу та комп'ютерного симулювання. Математичні моделі дозволяють точно описати напружено-деформований стан, а чисельні методи, зокрема методи скінченних елементів та згладжених частинок (SPH), забезпечують точне моделювання взаємодії між елементами конструкції та рідиною. Чисельні експерименти були проведені з використанням програмного комплексу LS-DYNA, що дало змогу визначити основні параметри процесу відриву, такі як максимальні напруження в зоні зварного з'єднання та розподіл деформацій у матеріалі резервуара. Результати чисельного моделювання показали, що основне руйнування відбувається саме в зварних з'єднаннях, через нижчу міцність шва порівняно з основним матеріалом резервуара. Це узгоджується з експериментальними даними, отриманими в лабораторних умовах. Для більш детального аналізу були проведені повний факторний експеримент та регресійний аналіз, що дозволили виявити ключові фактори, які впливають на процес відриву, та встановити емпіричні залежності між параметрами навантаження, матеріалу і геометрії зразків. Побудована регресійна модель демонструє високу кореляцію між обраними факторами та параметрами відриву резервуара. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування поведінки сталевих резервуарів під час пожежі та розробки рекомендацій для підвищення їхньої безпеки та міцності з урахуванням умов реальних експлуатаційних навантажень.

Ключові слова: відрив резервуара, зварне з'єднання, чисельне моделювання, факторний експеримент, регресійний аналіз

1. Вступ

У сучасних умовах інтенсивного використання нафтопродуктів та постійного зростання кількості об'єктів їхнього зберігання, дослідження в області безпеки резервуарів стають вкрай актуальними. Резервуари є ключовими елементами інфраструктури, що використовуються для зберігання та транспортування горючих рідин, однак їхня експлуатація пов'язана з ризиками, зокрема пожежами, вибухами та забрудненням навколишнього середовища. Існуючі методики часто не враховують реальних умов експлуатації або складних сценаріїв, таких як вплив екстремальних температур чи гідродинамічних ударів, що виникають у разі аварійних ситуацій.

Розв'язання цієї проблеми має суттєве значення для забезпечення техногенної, екологічної та економічної безпеки. Дослідження спрямовані на вдосконалення конструкцій резервуарів, підвищення їхньої стійкості до зовнішніх впливів та мінімізацію ризиків надзвичайних ситуацій. Розробка нових математичних моделей і експериментальних методик дозволяє глибше зрозуміти механізми деформації й руйнування резервуарів, а також прогнозувати їхній стан в екстремальних умовах.

Практичне значення таких досліджень важко переоцінити. Вони дають змогу створювати надійні конструкції, які відповідають сучасним стандартам безпеки, і

розробляти ефективні стратегії реагування на надзвичайні ситуації. Це сприяє не лише захисту навколишнього середовища, але й зменшенню економічних збитків у разі аварій. З огляду на це, тематика є надзвичайно актуальною для наукових досліджень та промислового впровадження.

Таким чином, проблема підвищення безпеки резервуарів для зберігання нафтопродуктів є не лише сучасною, але й критично важливою для забезпечення сталого розвитку інфраструктури та збереження екологічного балансу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дане дослідження присвячене наземним сталевим резервуарам зі стаціонарними дахами, на яких часто виникають пожежі [1, 2].

Роботи [3–7] зосереджуються на ключових аспектах дослідження пожеж у резервуарах з нафтопродуктами в Україні, пропонуючи аналіз ризиків та практичні рекомендації для підвищення безпеки таких об’єктів.

Автори статей [3, 4] детально аналізують специфіку горіння нафтопродуктів у резервуарах і пропонують заходи, спрямовані на посилення протипожежного захисту цих конструкцій. Проте в даних роботах не враховано вплив масштабів резервуарів на ефективність протипожежних заходів, а також бракує детального аналізу щодо взаємодії конструкцій з рідиною під час пожеж. Потребує розробка адаптованих моделей для об’єктів різного об’єму, конструкції та застосування чисельного моделювання процесів взаємодії.

У дослідженні [5] проведено оцінку ризиків виникнення пожеж у резервуарних парках для зберігання нафтопродуктів, враховуючи різні фактори, що впливають на безпеку експлуатації таких об’єктів. Також в даному дослідженні було б доцільно оцінити ризики та наслідки вибухів у резервуарних парках.

У роботах [6, 7] висвітлено методи забезпечення безпеки під час пожеж у резервуарах із нафтопродуктами, включаючи рекомендації щодо вибору протипожежного обладнання та засобів гасіння. Проте досліджувані моделі не враховують зміни у фізико-хімічних властивостях нафтопродуктів.Умови експлуатації резервуарних парків сьогодення потребують рекомендацій щодо модернізації старих резервуарів з урахуванням сучасних технологій, які було б доцільно сформулювати в межах даних наукових робіт.

Дослідження [8] акцентує увагу на аналізі впливу нестаціонарних теплових процесів у конструкціях вертикальних сталевих резервуарів, які виникають під дією теплових факторів пожеж, та їх впливі на міцність конструкцій. Але ґрунтовно не розглянуто питання щодо умов миттєвого відриву корпусу резервуара внаслідок пожежі на даних об’єктах. Розгляд та вирішення цієї проблематики є основним завданням нашого дослідження.

Загальна статистика руйнувань вертикальних сталевих резервуарів (РВС) свідчить, що 46,4 % випадків супроводжувалися масштабними пожежами з постраждалими. З них 6,4 % руйнувань стали наслідком прямого впливу високих температур і тиску. Механізм руйнування РВС є складним та ще недостатньо вивченим. За результатами експертних аналізів, головною причиною руйнувань РВС визначено пошкодження найкритичнішого елемента конструкції – вузла з’єднання стінки резервуара з його днищем [9–12].

Наукові дослідження [8–12] аналізують випадки вибухів та пожеж, визначаючи, що корпус резервуара найчастіше переміщується у напрямку обв’язки приймально-роздавальними пристроями. Зазначається, що польоти резервуарів

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

відбуваються за умови, що рівень рідини в них не перевищує половини висоти резервуара. Ці дані підкреслюють необхідність врахування характеру вибуху та траєкторії руху корпусу під час оцінки аварійних ситуацій і планування гасіння пожеж у резервуарному парку.

Аналіз закордонних досліджень [9, 10], які зосереджуються на вивченні міцності зварних з'єднань вертикальних сталевих резервуарів в умовах екстремальних навантажень, демонструє високий рівень уваги до проблеми надійності таких конструкцій в аварійних ситуаціях, зокрема за умов пожеж. У роботі [9] досліджено вплив пожеж на міцність сталевих резервуарів з використанням експериментальних і чисельних методів для оцінки стійкості різних типів зварних з'єднань. Зокрема у [9] зосереджено увагу на теоретичних моделях без підтвердження практичними експериментами.

Наступне дослідження [10] аналізує термічну поведінку сталевих резервуарів під впливом пожеж, приділяючи особливу увагу зварним з'єднанням та їх здатності витримувати високі температури та навантаження. У даній роботі не досліджено вплив рівня наповнення резервуара на його стійкість, що потребує подальшого вирішення.

У роботі [11] розглянуто чисельне моделювання термічних і структурних характеристик зварних з'єднань великих нафтових резервуарів під час пожеж, що дозволяє підвищити точність прогнозів щодо їхньої міцності. В даному дослідженні недостатньо опрацьовані сценарії, які пов'язані з різкими температурними змінами. Нами пропонується провести моделювання станів, які близькі до аварійних ситуацій.

Дослідження [12] присвячене аналізу впливу вибухових навантажень на зварні з'єднання великих резервуарів, з акцентом на їх міцність і можливі механізми руйнування. Вдосконаленням даної наукової роботи нами пропонується проведення оцінки поведінки резервуарів під час тривалого термічного впливу.

Під час вибухів РВС часто спостерігається відрив корпусу від днища, що супроводжується його переміщенням на значну відстань. Так, у випадку вибуху РВС-5000 корпус був відкинутий приблизно на 50 метрів, вибух РВС-700 призвів до переміщення корпусу на 25 метрів, а вибух РВС-3000 спричинив перекидання корпусу без подальшого польоту [1, 8]. Такі події свідчать про порушення балансу міцності між слабким швом між дахом і корпусом та сильним швом між корпусом і днищем. Через проєктні, виробничі чи експлуатаційні помилки слабкий шов може виявитися міцнішим, що призводить до відриву корпусу разом із дахом замість його відокремлення.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є дослідження динамічних параметрів та напружено-деформованого стану резервуарів під час їхнього відриву від днища внаслідок нагрівання газової фази в умовах пожежі. Невирішеною залишається задача розробки універсальної методики чисельного моделювання, що враховувала б вплив конструктивних особливостей резервуарів, рівня заповнення рідиною, а також термомеханічних характеристик матеріалів, і дозволяла б прогнозувати поведінку системи при екстремальних умовах, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій.

3. Мета та завдання дослідження

Мета дослідження полягає у виявленні закономірностей зміни параметрів руху частини резервуара після відриву від днища у залежності від його конструктивних параметрів та умов його заповнення.

Для досягнення мети були поставлені завдання:

1. Визначити базові параметри, геометричні характеристики резервуара, фізико-механічні властивості матеріалів, а також початкові та граничні умови, необхідні для побудови математичної моделі процесу відриву резервуара від днища під впливом пожежі.

2. Описати розроблені алгоритми та використані чисельні методи, що застосовуються для моделювання процесу відриву, враховуючи вплив нагріву газової фази, параметри зварних швів, взаємодію рідини та конструкції резервуара.

3. Представити отримані результати моделювання, які відображають кінематичні параметри руху, напружено-деформований стан елементів резервуара, а також визначити залежності між рівнем заповнення, умовами пожежі та висотою підйому нафтопродукту в резервуарі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – резервуари для зберігання нафтопродуктів, які піддаються впливу високих температур при пожежах.

Предмет дослідження – процеси напружено-деформованого стану конструкцій резервуарів та динаміка їх руху при відриві від днища.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що математичний опис динамічних процесів у системі «корпус резервуара-днище-рідина» із застосуванням моделей взаємодії твердих тіл, контактних і гідродинамічних явищ дозволить точно спрогнозувати моменти виникнення критичних напружень у зварних з'єднаннях. Оптимізація параметрів конструктивних елементів, таких як міцність зварних швів і жорсткість корпусу, забезпечує можливість зменшення ризику відриву корпусу від днища шляхом адаптації геометрії і матеріалів до умов підвищеного тиску й температури. Врахування динамічних характеристик рідини всередині резервуара, зокрема її тиску на стінки та взаємодії з поверхнею, дозволяє змоделювати механізм утворення хвиль тиску, які сприяють відриву днища, і розробити заходи для їх нейтралізації. Удосконалення методик моделювання, таких як використання AIRBAG-моделі для відображення впливу вибуху, а також методів штрафних функцій для аналізу контактної взаємодії, дозволить забезпечити високий рівень точності результатів чисельних експериментів.

Методика проведення дослідження базується на застосуванні чисельного моделювання для аналізу динамічних процесів, що відбуваються під час відриву корпусу резервуара від днища в умовах пожежі. Дослідження розпочинається з формулювання задачі, яка включає визначення фізичних і механічних характеристик конструктивних елементів резервуара та умов впливу високих температур і тиску. Основний підхід ґрунтується на використанні методів кінцевих різниць (МКР) і скінченних елементів (МКС) для опису напружено-деформованого стану (НДС) резервуара. Конструкція моделюється за допомогою оболонкових елементів Беличко-Цая [13] з урахуванням реальних геометричних параметрів, а поведінка рідини – за допомогою гідродинамічної моделі гладких частинок SPH.

Програмні засоби: використано програмний комплекс LS-DYNA для математичного моделювання процесів.

Апаратні засоби – обчислювальні ресурси високопродуктивних комп'ютерних систем для виконання чисельного аналізу.

5. Початкові дані та умови для проведення математичного моделювання

Початкові дані для моделювання відриву резервуара від днища під впливом пожежі були отримані під час дослідження процесів руйнування зварних

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

з'єднань [14] за допомогою методу ідентифікації міцності зварних з'єднань сталевих резервуарів за результатами механічних випробувань металевих зразків.

Метод був досліджений з точки зору точності отриманих результатів, щоб обґрунтувати його використання як інструмент для вивчення міцності зварних з'єднань, зокрема для виявлення закономірностей процесу відриву корпусу сталевого резервуара для нафтопродуктів від днища під час пожежі.

Модель для випробування складається з двох стержнів, що імітують стінки резервуара, з'єднаних між собою зварним швом. При моделюванні цієї конструкції враховано, що матеріал стержнів і зварного з'єднання має як геометричну, так і фізичну нелінійність, а також можливість виникнення великих деформацій, пластичних деформацій і руйнування елементів при досягненні критичних значень деформацій. Закон деформування матеріалу описується відповідною діаграмою, подібною до тих, що отримані в експериментальних дослідженнях [15]. Основні характеристики матеріалів зразка наведені у дослідженні [13] (табл. 1, 2).

Розрахунок проводився до моменту фрагментації зразка, що відображає руйнування зварного з'єднання, як показано на рис. 1. Після досягнення фрагментації, яка означає руйнування скінченних елементів зварного з'єднання, подальші розрахунки стають недоцільними.

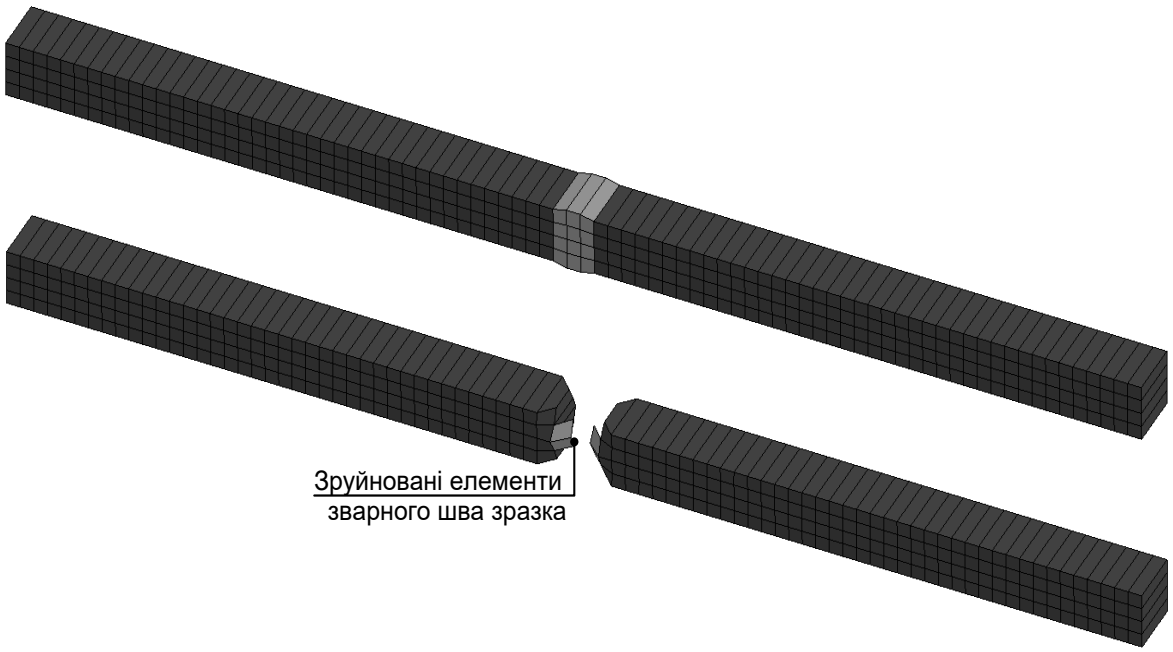


Рис. 1. Скінченно-елементні моделі конструктивної системи зварного з'єднання для випробувань до прикладення навантаження та після застосування руйнівного навантаження

Як видно на рис. 1, руйнування зразка відбулося вздовж зварного шва, оскільки його міцність була меншою, ніж у основного матеріалу стержнів, що були з'єднані за допомогою зварювання. Це відповідає результатам практичних експериментів, представленим у дослідженні [15].

На рис. 2 показано розподіл основних, найбільших напружень у момент руйнування зварного шва.

На основі проведених розрахунків були отримані графіки, що демонструють залежність найбільших нормальних напружень від відносного переміщення. Дані графіки приведено на рис. 3.

Лінії 1 і 2 на графіках (рис. 3) представляють результати, отримані шляхом

моделювання та експериментальних досліджень відповідно. Отримані криві демонструють високу відповідність розрахункових результатів з експериментальними даними, що підтверджує правильність обраних математичних моделей для розрахунку резервуара з паливом під час його відриву від днища.

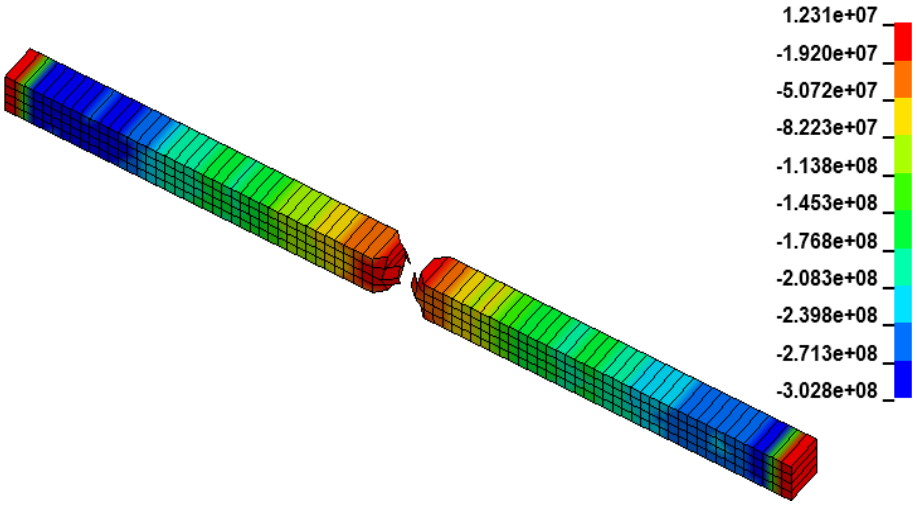
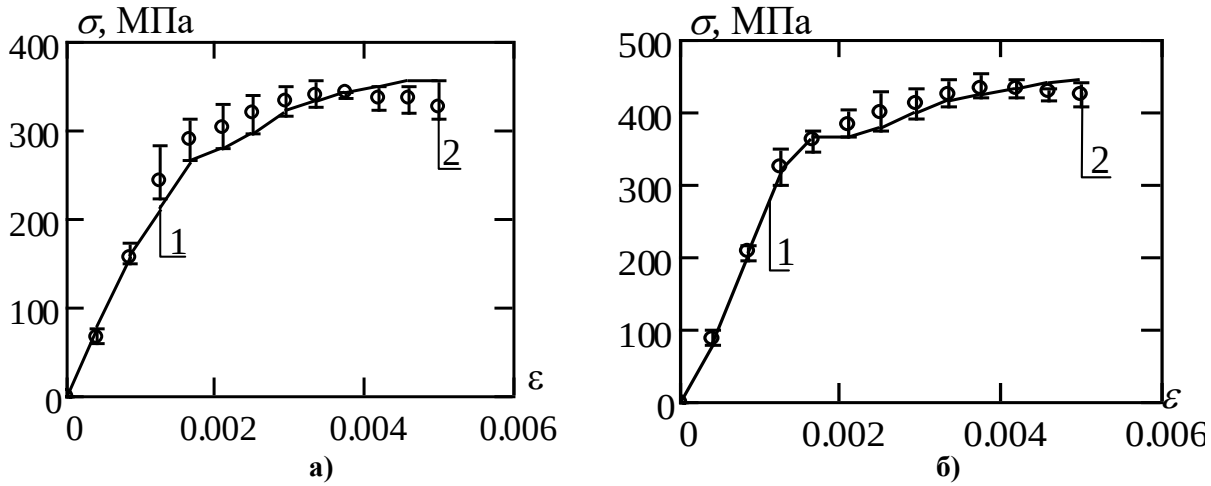


Рис. 2. Розподілення поздовжніх напружень у зразку зварного з'єднання під час випробування



а) б)

Рис. 3. Графіки залежностей для зразків II типу з межами відхилень: а – між прикладеним навантаженням та видовженням; б – між напруженням і відносною деформацією

Для більш детального оцінювання була проведена перевірка адекватності розрахункових результатів з використанням статистичних критеріїв, результати якої наведені в табл. 1.

Аналіз даних з цієї таблиці свідчить, що розрахункові результати є точними, і застосовані моделі можуть бути ефективно використані для моделювання процесів, що відбуваються в резервуарі під час відриву днища в умовах пожежі.

6. Методика математичного моделювання відриву резервуара від днища під впливом пожежі

Нафтопродукти зазвичай зберігаються на спеціалізованих об'єктах, таких як нафтобази та парки, які оснащені резервуарами. Найпоширенішими є резервуари вертикальної конструкції, схематичний вигляд якого представлено на рис. 4. Конструкція цього типу резервуара відповідає вимогам, що прописані у стандартах.

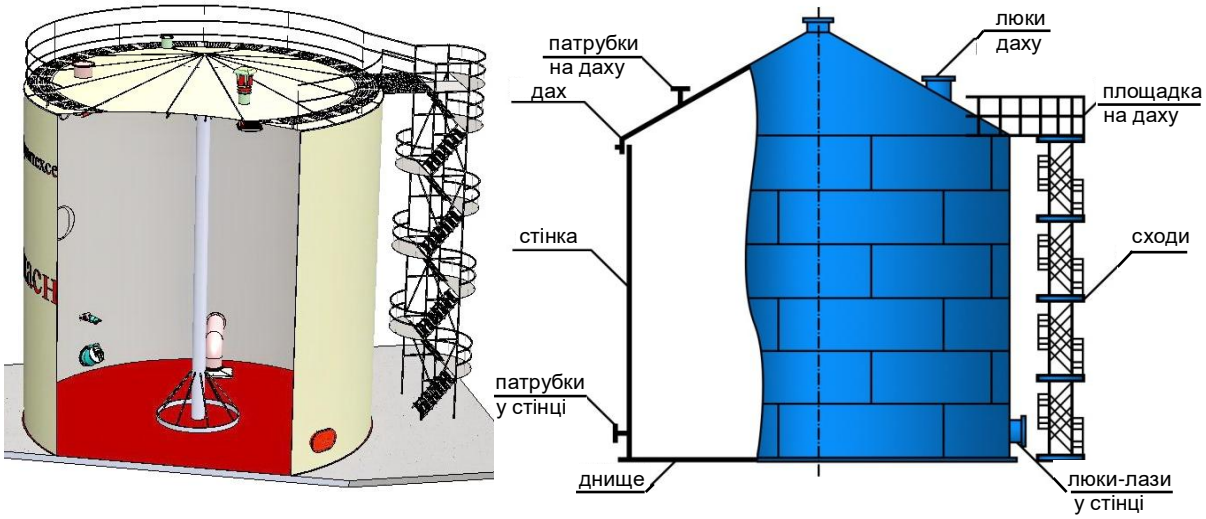
© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

Як показано на рис. 4, конструкція резервуара складається з вертикальних стінок, днища та покриття, що виготовляються зі сталевих листів, з'єднаних між собою зварними швами.

Табл. 1. Статистичні критерії аналізу адекватності результатів розрахунку

Число ступенів вільності чисельника, v_1	Число ступенів вільності знаменника, v_2	Кількість експериментів, d	Кількість вимірювань в експерименті, n	Дисперсія відтворюваності	Дисперсія адекватності	Розрахункове значення F-критерію	Табличне значення F-критерію	Середнє відносне відхилення, %	Середньоквадратичне відхилення, МПа
Зразки I типу									
12	12	2	12	120,9	2,1	0,64	1,61	10,6	6,3
Зразки II типу									
12	12	2	12	130,3	2,7	0,91	1,74	11,9	4,1

Для моделювання процесу відриву резервуара з нафтопродуктами від днища було обрано резервуар з типовою конструкцією, як зазначено у дослідженні [13, 15]. Ця конструкція є однією з найбільш поширених на нафтобазах та парках по зберіганню нафтопродуктів в Україні.



а) **б)**

Рис. 4. Резервуар для зберігання нафтопродуктів: а – конструкція та внутрішній устрій; б – конструктивна схема

На рис. 5. показані геометричні параметри конструктивних елементів резервуара, що використовуються в дослідженні.

Для здійснення моделювання розглянуто геометрію та компоненти моделі у двох типових варіантах. Перший варіант – це резервуар незаповнений нафтопродуктами, другий варіант – резервуар заповнений нафтопродуктами до різного рівня. На схемах (рис. 6) приведено обидва варіанти, що розглядаються.

Для моделювання процесу відриву днища від резервуару були сформульовані ключові положення, які включають наступне.

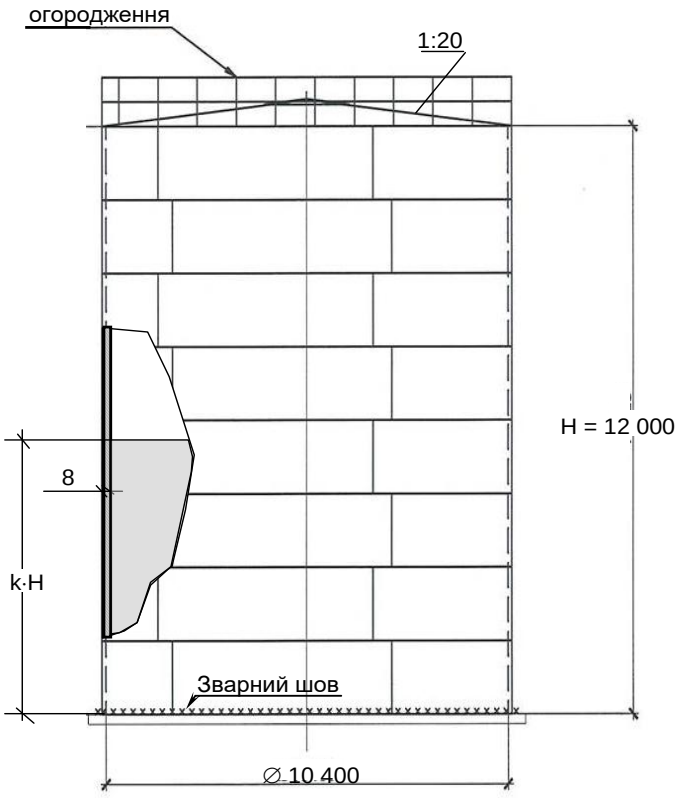


Рис. 5. Геометричні параметри конструктивних елементів резервуару для зберігання нафтопродуктів, що прийнята для математичного моделювання його відриву від днища

1. Для математичного опису напружено-деформованого стану в конструктивних елементах резервуара, коли відбувається відрив від днища, використовується інженерно-теоретичний підхід, що базується на явному методі інтегрування рівнянь механіки взаємодії деформованих твердих тіл.

2. Загальний інженерно-теоретичний підхід полягає у визначенні переміщень точок конструкції, що складається з твердих деформованих елементів, за допомогою числового інтегрування загальних рівнянь динаміки методом кінцевих різниць та рівнянь напружено-деформованого стану, застосовуючи метод скінченних елементів.

3. Для моделювання стінок резервуара та зварних з'єднань із метою зменшення розмірності задачі та на основі прийнятих гіпотез використовуються плоскі чотирьохвузлові скінченні елементи типу оболонок Беличко-Цая [13], з п'ятьма точками інтегрування по товщині елементу.

4. Для моделювання зварних з'єднань та сталі огородження резервуара застосовується модель пружно-пластичного матеріалу з можливістю опису деформацій через білінійні діаграми, типу Прандтля, де є ділянка пружності та похила ділянка зміцнення з граничною деформацією [15].

5. Математичне моделювання рідини, якою є нафтопродукт, здійснюється за допомогою частинок, що характеризуються лише масою і мають надзвичайно малі геометричні розміри. Для опису руху частинок і їх контактної взаємодії використовується гідродинамічна модель SPH (Smooth Particles Hydrodynamics), що реалізована за допомогою моделі Монагана [16], що описує взаємодію між частинками із властивою для рідин в'язкістю.

6. Система розглядається за нормальних атмосферних умов, з урахуванням

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

гравітації та температури. Теплообмін між рідиною нафтопродукту та стінками резервуара не враховується.

7. Для аналізу контактної взаємодії частинок з огороджувальною поверхнею застосовується математична модель контакту, основана на методі штрафних функцій.

8. Прикладення тиску до стінок резервуара та поверхні рідини моделюється за допомогою моделі AIRBAG, яка реалізована в програмному комплексі LS-DYNA [17].

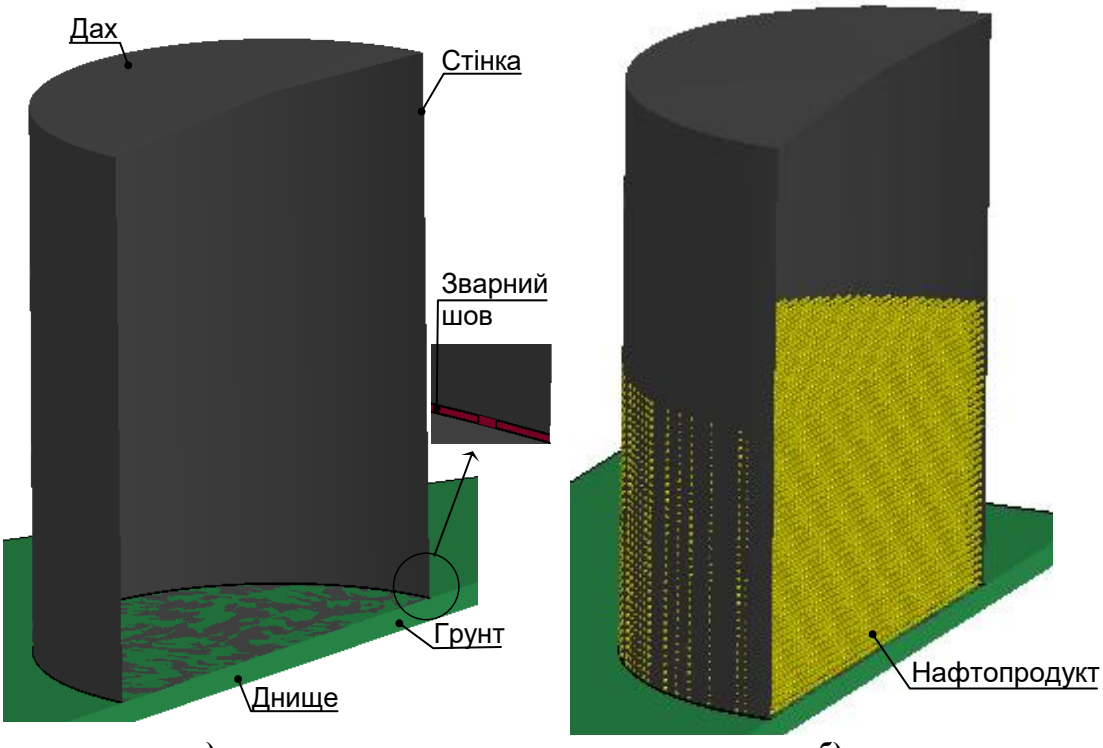


Рис. 6. Вихідні схеми резервуарів для моделювання процесу відриву днища: а – перший варіант; б – другий варіант

В якості математичного апарату для описання динамічних процесів у резервуарі при його відриві від днища та витікання рідини було використано модель частинок SPH (Smooth Particles Hydrodynamics). Вказана математична модель для динамічних систем, що включають *N* тіл була використана у роботах Lucy, Gingold та Monaghan [16]. Даний підхід був розвинутий у якості альтернативі методу скінченних елементів для обходу обмежень, що притаманні останньому при виникненні обчислювальних проблем за умов виникнення великих та швидких деформацій. Головна відмінність між звичайним підходом на основі метода скінченних елементів та підходом, заснованим на використанні математичної моделі SPH, полягає у відсутності сітки. У такому разі рух даних частинок описується основною системою рівнянь динаміки, що описані вище.

Для описання руху частинок використовується апроксимаційна функція, що має такий вигляд:

$$\Pi^{h} f(x) = \int f(y) W[x - y, h] dy , \qquad (1)$$

де W – функція ядра, яка описується формулою:

$$W(\mathbf{x},h)=\frac{1}{h(\mathbf{x})^{-d}}\theta(\mathbf{x}). \tag{2}$$

В даній формулі параметр d – кількість вимірів моделі, а параметр h – згладжувальна довжина, що змінюється у залежності від часу та поточного розташування частинки.

Відповідно до основної гіпотези даної теорії функція ядра досягає максимуму у певній точці, що залежить від поточного положення частинки, як це проілюстровано на рис. 7. Для встановлення згладжувальної функції ядра застосовується кубічна B-сплайн апроксимація з використанням формули:

$$\theta(u)=C\times\begin{cases}1-\frac{3}{2}u^2+\frac{3}{4}u^3, & |u|\le 1\\ \frac{1}{4}(2-u)^3, & 1<|u|\le 2\\ 0, & 2<|u|\end{cases}, \tag{3}$$

де C – це константа нормалізації, залежна від числа просторових вимірів.

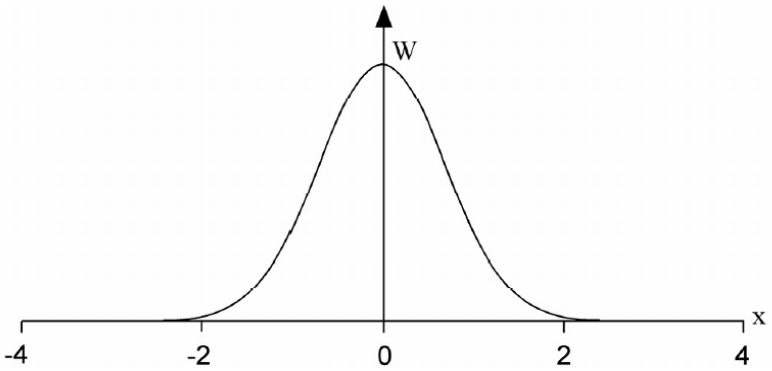


Рис. 7. Геометрична візуалізація функції ядра

Математична модель SPH заснована на використанні квадратичної форми рівняння для описання руху частинок з множини ($\mathbf{x}_i(t)$), i ∈ {1..N}. Вектор $\mathbf{x}_i(t)$ встановлює набір координат положення частинки під час її руху за напрямком вектору її швидкості **v**.

В цьому разі апроксимаційна функція для всієї множини частинок записується через вираз

$$\Pi^h f(x)=\sum_{j=1}^{N} w_j f(\mathbf{x}_i) W[\mathbf{x}_i-\mathbf{x}_j,h], \tag{4}$$

де $w_j = m_j/\rho_j$ – «вага» частинки, яка є пропорційно залежною від дивергенції потоку.

Конкретизуючи дані математичні моделі до певної точки у просторі розрахункової області можна перейти до рівнянь із диференціальними операторами. При цьому вираз (4) можна перетворити на формулу:

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

$$\Pi^h \nabla f(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} \left[f(\mathbf{x}_j) A_{ij} - f(\mathbf{x}_i) A_{ji} \right], \tag{5}$$

де $A_{ij} = \frac{1}{h^{d+1}} \theta' \left[\frac{\|x_i - x_j\|}{h} \right]$.

Рівняння (5) у часткових похідних можна записати у такій формі:

$$\Pi^h \left\{ \frac{\partial f}{\partial x^\alpha} \right\} (\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} \frac{m_j}{\rho_j} f\left(\mathbf{x}_j A^\alpha (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \right), \tag{6}$$

де $A(x_i, x_j) = \frac{x_i - x_j}{h^{d+1}(x_i, x_j) \cdot \|x_i - x_j\|} \theta' \left(\frac{\|x_i - x_j\|}{h(x_i, x_j)} \right)$, A^α – компонент вектора А, який відповідає певній координаті розташування точки.

При числовому розв'язку рівняння (6) вводиться апроксимація за дискретизованою «слабкою» формою. При цьому записується диференціальний оператор:

$$L_v^*(\phi) = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_{l=1}^{d} v^l \frac{\partial \phi}{\partial x^l}. \tag{7}$$

Апроксимаційна форма цього оператора записується на основі дискретної форми взаємодії частинок:

$$D_{h,s}^* \phi(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} w_j \left[\phi(\mathbf{x}_i) A_{ij} - \phi(\mathbf{x}_j) A_{ji} \right]. \tag{8}$$

Записаний таким чином дискретний оператор взаємодії частинок, який апроксимує часткові похідні, також записується для α-компоненту оператора (9).

$$D_\alpha^* \phi(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} w_j \left[\phi(\mathbf{x}_i) A^\alpha (\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) - \phi(\mathbf{x}_j) A^\alpha (\mathbf{x}_j, \mathbf{x}_i) \right]. \tag{9}$$

Використовуючи такий дискретний запис, записуються рівняння, які відображають закони збереження. Дані рівняння у дискретизованій формі записуються у такому вигляді.

Рівняння зберігання моменту імпульсу:

$$\frac{d\mathbf{v}^\alpha}{dt}(\mathbf{x}_i) = \sum_{j=1}^{N} m_j \left(\frac{\sigma^{\alpha,\beta}(\mathbf{x}_i)}{\rho_i^2} A_{ij} - \frac{\sigma^{\alpha,\beta}(\mathbf{x}_j)}{\rho_j^2} A_{ji} \right), \tag{10}$$

де m – маса частинки; **v** – вектор швидкості; α, β – індекси напрямків осей у розрахунковому просторі; σ – в'язкі напруження.

Рівняння зберігання енергії у дискретизованій формі:

$$\frac{dE}{dt}(\mathbf{x}_i) = -\frac{P_i}{\rho_i^2}\sum_{j=1}^{N} m_j\left(v(\mathbf{x}_j) - v(\mathbf{x}_i)\right)A_{ij}\,, \tag{11}$$

де P є потенціальною енергією частинки.

Ідентифікація взаємодії частинок при їхньому контакті є важливою частиною обчислювального алгоритму. Дана процедура має у своїй основі пошук частинок що входять у контактну взаємодію у поточний момент часу. Операція сортування частинок за ознакою контактної взаємодії полягає у розгалуженні розрахункового простору на окремі блоки де здійснюється таке сортування. При розділенні простору моделі найближчі частинки розташовуються або у одному блоці, або в різних суміжних блоках. Даний метод дозволяє знизити кількість обсяг розрахунків щодо відстаней, і це суттєво збільшує продуктивність розрахункових операцій.

З метою наближення до відтворення в'язкості рідини дана модель доповнюється моделлю штучної в'язкості. Головне призначення даної моделі полягає у зменшення обсягу розрахунків за рахунок встановлення суцільності простору розрахункової області. Для цього використовується математична модель Монагана-Джингольда штучної в'язкості [18]. Згідно із даною моделлю при визначенні тиску між частинками враховується штучний в'язкий тиск, який обчислюється за формулою:

$$p_i \to p_i + \Pi_{ij},\ \Pi_{ij} = \frac{1}{\bar{\rho}_{ij}}\left(-\alpha\mu_{ij}\bar{c}_{ij} + \beta\mu_{ij}^2\right), \tag{12}$$

де $\bar{c}$ – адіабатична середня швидкість звуку, μ_{ij} – параметр в'язкості, який розраховується за формулою:

$$\mu_{ij} = \begin{cases} \bar{h}_{ij}\dfrac{r_{ij}\left(v_i - v_j\right)}{r_{ij}^2 + 0.01\bar{h}_{ij}^2}, & r_{ij}\left(v_i - v_j\right) < 0 \\ 0, & r_{ij}\left(v_i - v_j\right) \geq 0 \end{cases}. \tag{13}$$

При інтегруванні рівнянь для описання стану частинок використовується класична схема першого порядку. Крок інтегрування за часом обчислюється за виразом:

$$\delta t = C_{CFL}\ \min_i\left(\frac{h_i}{c_i + v_i}\right), \tag{14}$$

де C_{CFL} – число Куранта-Фрідріхса-Леві.

Процес розрахунку за описаною вище математичною моделлю здійснюється у такій послідовності.

1. Встановлюються граничні умови, а також умови контакту між частинками та поверхнею огородження резервуару.

2. Обчислюються прискорення частинок.

3. Обчислюються швидкості частинок.

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

4. За викладеним математичним описанням обчислюється згладжувальна довжина частинок.

5. Проводиться ідентифікація частинок що входять у контактну взаємодію між собою.

6. Обчислюється коефіцієнти густини та деформування.

7. За обчисленими даними за допомогою числового інтегрування розраховується енергія, тиск та напруження.

8. За розрахунковими даними обчислюються сили взаємодії між частинками.

9. Описані розрахункові операції циклічно повторюються на кожному кроці інтегрування.

Для моделювання компонентів динамічної системи, що являє собою резервуар із рідиною нафтопродукту використовується три типи матеріалів: матеріал частинок, матеріал огородження резервуара та матеріал для грунту, на якому встановлюється резервуар. Для описання НДС огородження резервуару використовується матеріал PLASTIC KINEMATIC Material type № 003, що описаний вище. Основні відомості щодо моделей описаних матеріалів подані у табл. 2.

Табл. 2. Основні відомості щодо моделей матеріалів механічної системи резервуара із рідиною нафтопродукту

Матеріал частинок	Матеріал для моделювання грунту на якому встановлюється резервуар
Матеріалу компоненту моделі та його номенклатурне позначення у LS-DYNA	
MAT_009 – MAT_NULL	MAT_020 – MAT_RIGID
Призначення математичної моделі матеріалу	
Модель матеріалу призначена для визначення характеристик ідеалізованого матеріалу, в якому не потрібно обчислювати внутрішні напруження що є компонентами девіатору напружень. При цьому можна не врахвувати міцність матеріалу. В'язкі напруження розраховуються за виразом: $\sigma_{ij} = \mu\dot{\varepsilon}'_{ij}$, де $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ – швидкості зростання девіаторних деформацій. Використання даного матеріалу також обумовлюється можливістю ідентифікації контактної взаємодії між частинками та суміжним твердим тілом	Модель матеріалу використовується коли не потрібно визначати напружено-деформований стан у внутрішніх шарах іла, що входить у динамічну систему. При цьому є можливість обумовлення інерційних характеристик тіл. Для даного матеріалу також можна здійснити обумовлення його пружних характеристик при описанні пружної взаємодії при контакті тіл із даною моделлю матеріалу та іншими тілами-компонентами системи. Такий матеріал може бути застосований для зумовлення попередньо заданих умов руху всієї системи, оскільки існує можливість опціонально задавати їх ступені вільності та їх закони руху

Для описання контакту між частинками та огородженням резервуара використовується теорія контактної взаємодії між вузлами та поверхнями скінченних елементів. Для ідентифікації контактної взаємодії між вузлом та поверхнею скінченного елементу використовується метод штрафних функцій, а для описання умов силової взаємодії між ними використовуються попередньо задані механічні характеристики матеріалів.

Використовуючи складену геометричну модель резервуару без та з рідиною нафтопродукту, була побудована скінченно-елементна схема наведена на рис. 8.

На рис. 9 наведені граничні умови та умови контактної взаємодії між компонентами моделі.

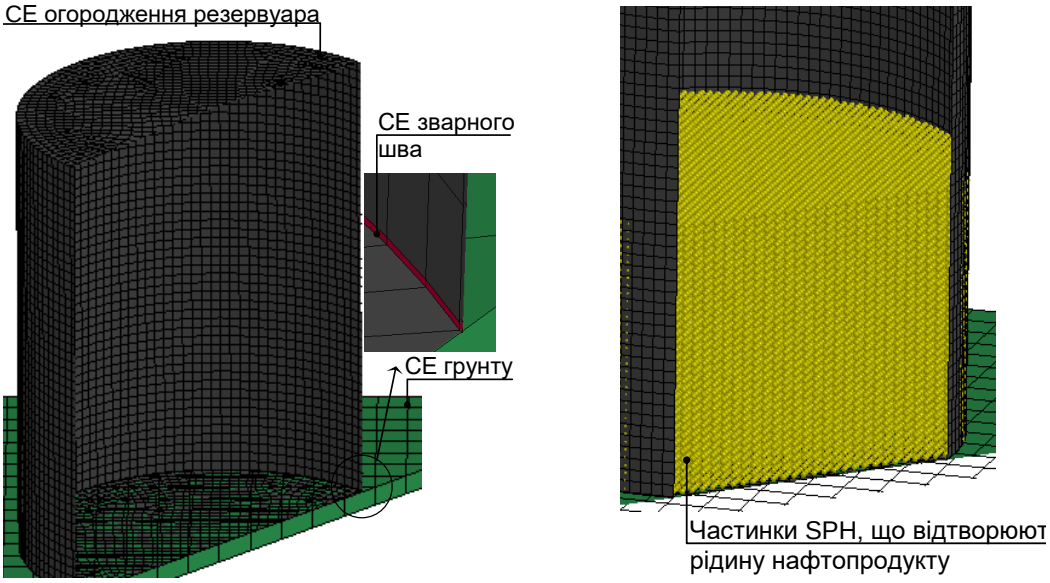


Рис. 8. Скінченно-елементні схеми компонентів моделі резервуара для моделювання процесу відриву днища: а – перший варіант; б – другий варіант

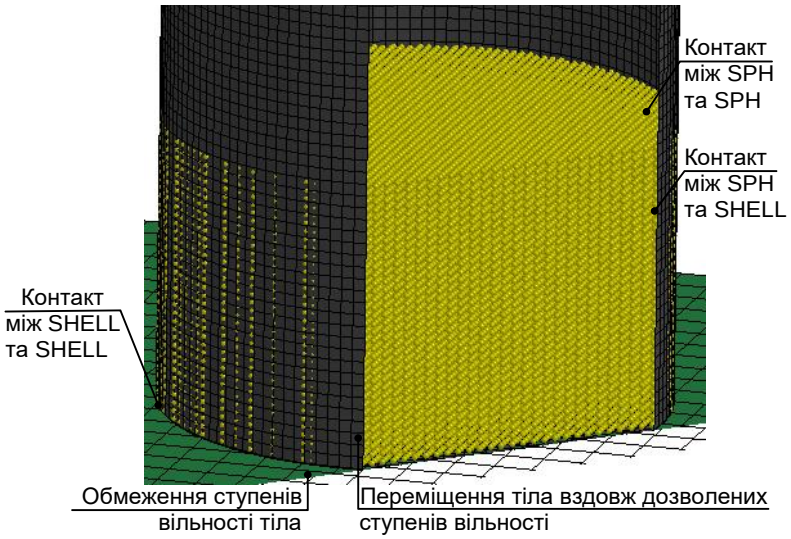


Рис. 9. Скінченно-елементна схема компонентів моделі резервуара для моделювання процесу відриву днища із граничними умовами

Згідно із табл. 2 були обрані матеріали на компоненти моделі резервуара. На рис. 10 наведено схема компонентів моделі резервуара із моделями матеріалів, що використовуються для описання поведінки компонентів моделі.

Характеристики матеріалів, що були застосовані для побудови моделі резервуара були прийняті за ДСТУ Б В.2.6-183:2011.

У табл. 3 наведені величини прийнятих параметрів властивостей матеріалів.

Табл. 3. Величини параметрів щодо властивостей матеріалів резервуара із нафтопродуктом (дизельне пальне)

Матеріал	Густина, ρ, кг/м^3	Модуль пружності, E, МПа	Коефіцієнт Пуасона, ν	В'язкість (штучна), μ
Абсолютно твердий матеріал	1900	900	0,3	-
Нуль-матеріал (матеріал частинок)	830	-	-	0,001

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

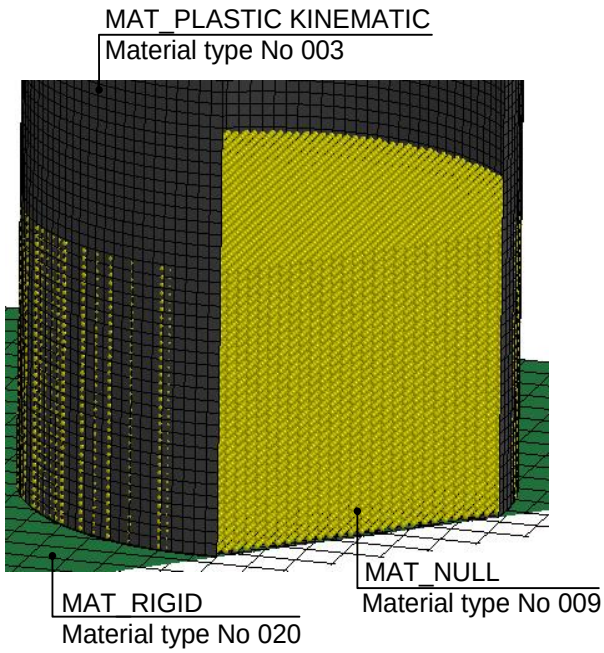


Рис. 10. Скінченно-елементна схема компонентів моделі резервуара для моделювання процесу відриву днища із призначеними моделями матеріалів

Параметри матеріалу стінок та зварного шва резервуара наведені у [14] (табл. 1 та табл. 2).

Перед прикладанням тиску до стінок резервуара та поверхні частинок рідини нафтопродукту (дизельне пальне) за моделлю AIRBAG необхідно прикласти до компонентів моделі сили гравітації. Для уникнення динамічних ефектів у вигляді сильних початкових імпульсів, що є причиною коливальних рухів з великою амплітудою, гравітаційне навантаження повинно прикладатися повільно на попередній фазі розрахунку. Для цього перед проведенням основного динамічного розрахунку, прискорення гравітації прикладається до кожного компоненту моделі на часовому інтервалі тривалістю 5 с із завданням опції загального динамічного демпфування. Відповідно до скінченно-елементних схем, що наведені на рис. 10, кількісні характеристики кінцевих елементів зведені до табл. 4. У табл. 4 враховується, що згідно із прийнятою методикою числових експериментів щодо дослідження динамічних характеристик резервуара і рідини нафтопродукту розглядається чотири варіанти заповнення резервуара: 0 %, 25 %, 50 % та 75 %.

Табл. 4. Основні кількісні дані щодо кінцевих елементів моделі резервуара із нафтопродуктом

Тип заповнення резевуара, %	Кількість СЕ типу SHELL	Кількість частинок типу SPH	Кількість масивних СЕ типу SOLID
0	10 092	0	53
25		49 490	
50		98 980	
75		148 470	

Після прикладання гравітаційних прискорень до системи опція демпфування вимикається. Наприкінці даної процедури прикладається відповідний тиск за моделлю AIRBAG до стінок резервуара та поверхні рідини нафтопродукту.

7. Результати математичного моделювання відриву від днища резервуара із нафтопродуктом

Варіюючи рівень заповнення, було встановлено, що розглядається всього 4 експериментальні ситуації, що описані у табл. 4.

Згідно із першим варіантом відсутності заповнення резервуару рідиною нафтопродукту розглядається випадок, коли резервуар має дуже низький рівень заповнення, унаслідок вигорання майже всього палива при поступовому витоку парів рідини нафтопродукту. При цьому рівень рідини нафтопродукту настільки низький що ним можна знехтувати. На рис. 11 показано положення резервуара у певні моменти часу після прикладання тиску до стінок резервуара.

Як можна побачити з рис. 11 при збільшенні тиску всередині резервуара відбувається його відрив від днища та підлітання на певну висоту, а потім падіння на поверхню грунту, що узгоджується із даними спостережень, що наведені у роботі [8]. В даному випадку можна зазначити, що стінки резервуара та його покриття мають помітну пластичну деформацію.

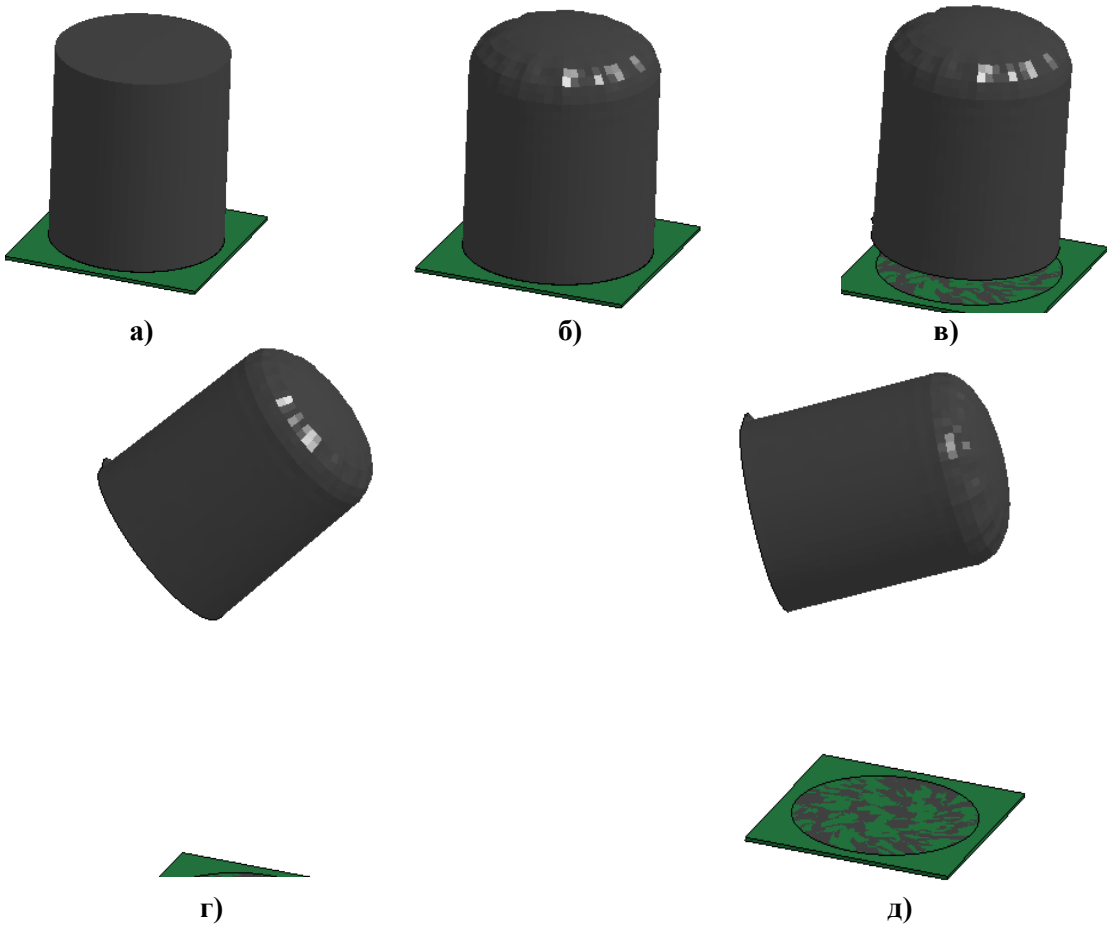


Рис. 11. Положення відірваної від днища верхньої частини резервуара у різні моменту часу: а – після прикладення гравітаційних сил; б – перед відривом від днища; в – 0,1 с польоту; г – у найвищій точці підйому; д – на стадії зниження

Для аналізу механізму руйнування зварного з'єднання було побудовано картини розподілу найбільшого головного напруження у огороджувальних конструкціях резервуара. Дані картини показані на рис. 12.

З рис. 12 видно, що відрив верхньої частини резервуара відбувається по зварному шву, оскільки він є менш міцним за основний матеріал.

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

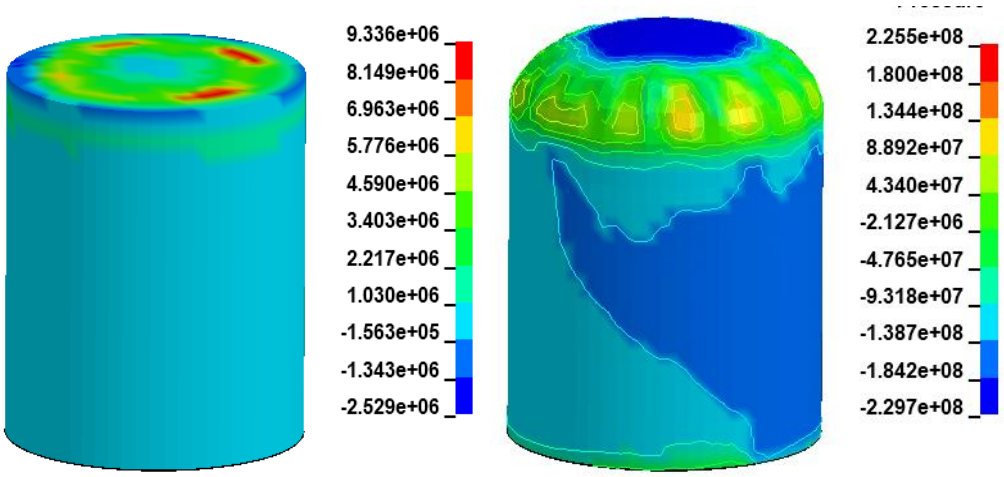


Рис. 12. Розподілу найбільшого головного напруження у огороджувальних конструкціях резервуара: а – після прикладення гравітаційних сил; б – перед відривом від днища

З метою аналізу траєкторії підльоту верхньої частини резервуара було побудовано графік зміни максимального вертикального зміщення резервуару у залежності від часу. Побудований графік наведений на рис. 13.

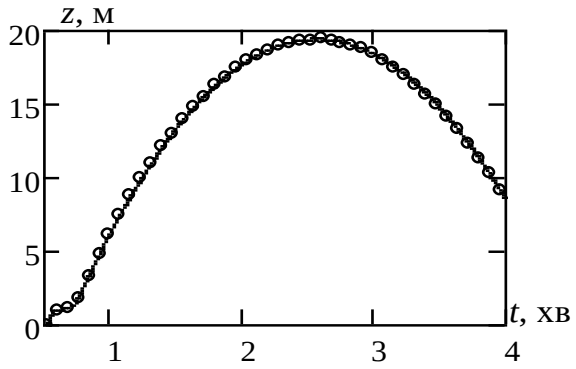


Рис. 13. Залежність максимального вертикального переміщення верхньої частини резервуара від часу при його відриві від днища

Згідно із графіком, наведеним на рис. 13 верхня частина резервуару при його відриві від днища піднімається вверх на максимальну висоту близько 20 м.

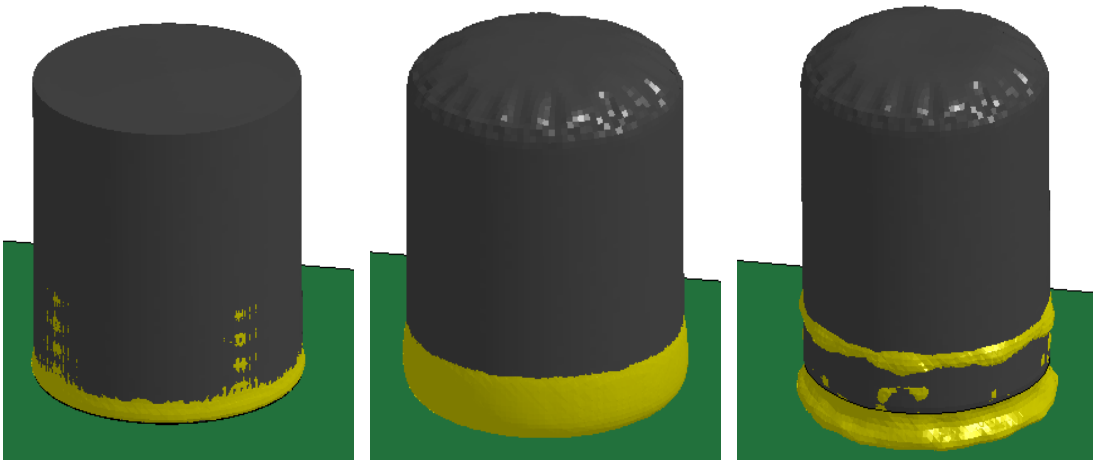
При вивченні випадків відриву резервуара від днища з причини підвищення тиску у ньому внаслідок нагрівання газу у порожнині між рідиною та огородженням резервуару було розглянуто інші три варіанти. На рис. 14 та рис. 15 наведено положення заповненого наполовину резервуара, у певні моменти часу після прикладання тиску до стінок резервуара та поверхні рідини.

З метою аналізу траєкторії підльоту верхньої частини наполовину заповненого резервуара було побудовано графік зміни максимального вертикального зміщення резервуару у залежності від часу. Побудований графік наведений на рис. 16.

Аналогічні графіки були побудовані за результатами математичного моделювання відриву від днища резервуарів, заповнених на 25 % та 75 %, згідно із табл. 4. Побудовані графіки наведені на рис. 17.

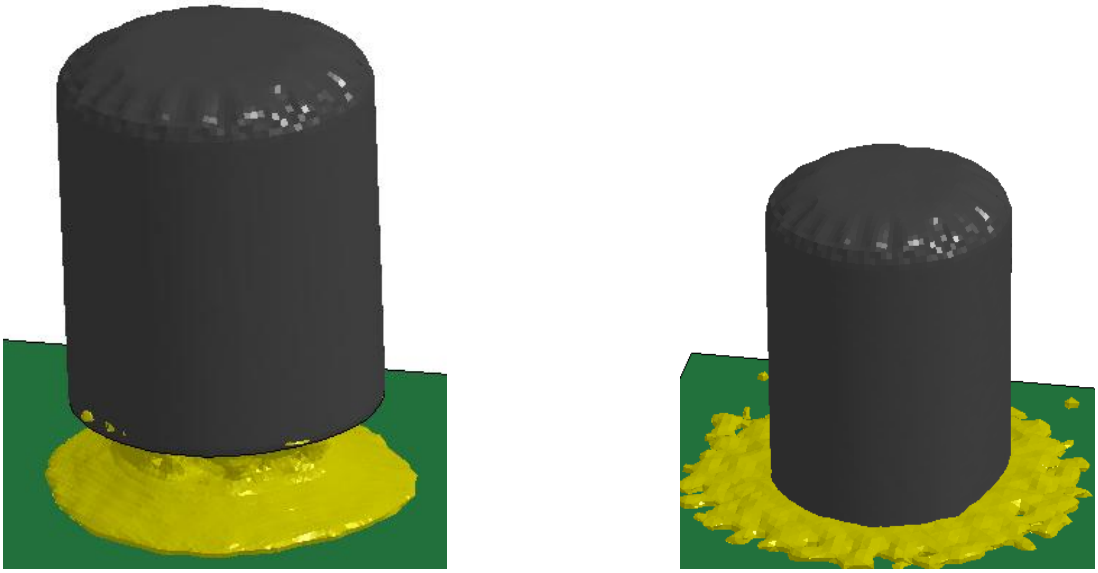
На рис. 17 можна прослідкувати залежність максимальної висоти підлітання від рівня заповнення резервуара. Можна зазначити, що чим вище рівень заповнення резервуара, тим нижче висота підйому. Це можна пояснити тим, що при від-

риві резервуара від днища енергія витрачається на підйом частини рідини, що ще не витекла з резервуару.



а) б) в)

Рис. 14. Положення відірваної від днища верхньої частини наполовину заповненого резервуара у різні моменту часу: а – після прикладення гравітаційних сил; б – перед відривом від днища; в – 0,1 с польоту



а) б)

Рис. 15. Положення відірваної від днища верхньої частини наполовину заповненого резервуара у різні моменту часу: а – напередодні моменту приземлення; б – у момент приземлення

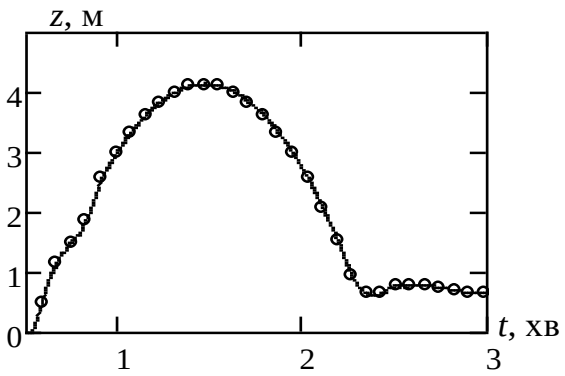


Рис. 16. Залежність максимального вертикального переміщення верхньої частини резервуара від часу при його відриві від днища

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

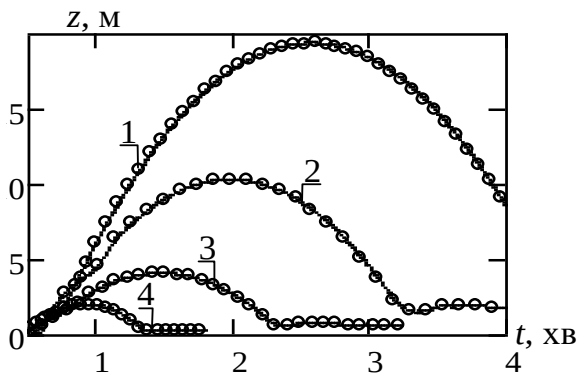


Рис. 17. Залежності максимального вертикального переміщення верхньої частини резервуара від часу при його відриві від днища при різному рівні їх заповнення: 1 – 0 %; 2 – 25 %; 3 – 50 %; 4 – 75 %

На рис. 18 наведена залежність висоти підйому відірваної від днища частини резервуара від рівня його заповнення.

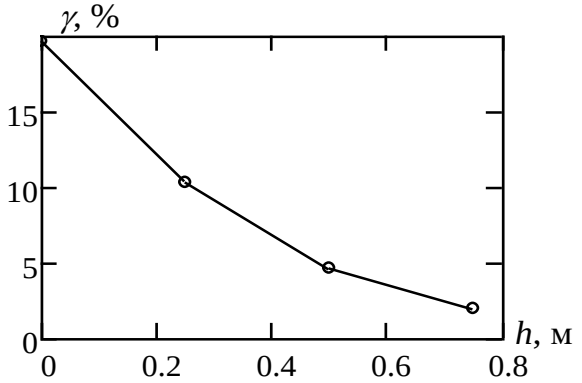


Рис. 18. Залежність висоти підйому відірваної від днища частини резервуара від рівня його заповнення

Згідно із графіком, наведеним на рис. 18, висота підйому верхньої частини резервуара при його відриві від днища суттєво залежить від рівня його заповнення і монотонно зменшується при збільшенні рівня рідини нафтопродукту, що зберігається у резервуарі.

8. Обговорення результатів математичного моделювання відриву від днища резервуара із нафтопродуктом

Мета даного дослідження виконувалась шляхом використання чисельних методів моделювання, зокрема, інтеграції SPH-методу для опису динамічної взаємодії рідини та конструкції резервуара. Проведено аналіз напружено-деформованого стану із застосуванням скінченно-елементного підходу для визначення механічних параметрів резервуара. У дослідженні також враховано тепловий вплив, що моделювався за допомогою відповідної газодинамічної моделі, та параметри руху системи після відриву. Результати були валідовані шляхом порівняння з існуючими теоретичними та експериментальними даними, що підтвердило ефективність запропонованого підходу. Отримані результати пояснюються використанням інтегрованих методів чисельного моделювання, що базуються на теорії взаємодії гідродинамічних і механічних систем. Основну роль відіграє врахування термічного впливу на газ у порожнині резервуара, що спричиняє відрив днища через

накопичення тиску. Параметри руху визначені на основі аналізу нелінійного напружено-деформованого стану резервуара.

Запропонований метод відрізняється інтеграцією SPH-методу для опису рідини та моделі AIRBAG для визначення динамічних навантажень. У порівнянні з існуючими методиками, запропонована модель дозволяє детально врахувати вплив взаємодії газу, рідини та конструкційних елементів резервуара, що забезпечує високу точність прогнозування параметрів руху після відриву.

Дослідження обмежене застосуванням спрощених матеріальних моделей, зокрема білінійного закону деформування сталі, що не враховує повністю анізотропію матеріалу. Крім того, розрахунки виконані для нормальних атмосферних умов без урахування впливу зовнішніх чинників, таких як вітер чи механічні пошкодження.

До недоліків можна віднести недостатню валідацію моделі на основі експериментальних даних. У перспективі необхідно провести масштабні експериментальні дослідження, що підтвердять отримані чисельні результати. Також слід уточнити параметри взаємодії між елементами конструкції та рідиною для підвищення точності моделі.

Розвиток дослідження може включати адаптацію моделі для різних типів резервуарів, врахування мультифізичних впливів, таких як хімічні реакції та корозійні процеси. Викликами можуть стати збільшення обчислювальних витрат при розрахунках складніших сценаріїв та інтеграція експериментальних даних для покращення точності моделювання.

9. Висновки

1. Дослідженням виявлено, що при заданих початкових умовах температурний вплив у зоні контакту резервуара та рідини з нафтопродуктом істотно змінює напружено-деформований стан матеріалів. Встановлено, що максимальні напруження у зварних швах резервуара зростають на 35 % при досягненні температури газу в порожнині 600 °С, що відповідає сценарію активного горіння. Ці дані підтверджують необхідність врахування таких умов у моделюванні.

2. Методика моделювання, яка включає підхід гідродинаміки згладжених частинок та чисельний аналіз в LS-DYNA, забезпечила детальну оцінку динаміки відриву резервуара. Зокрема, було визначено, що максимальна висота підйому резервуара становить від 8 до 15 м залежно від рівня заповнення. Це дозволяє оцінити критичні умови, за яких можливі аварійні сценарії.

3. Результати моделювання також показали, що при заповненні резервуара менш ніж на 50% висота його підйому збільшується майже на 20 % через зниження маси системи. Це вказує на необхідність врахування рівня заповнення у системах моніторингу та розробці стратегій пожежної безпеки для об’єктів зберігання нафтопродуктів.

Література

1. World Fire Statistics 2011–2023. URL: https://www.ctif.org/world-fire-statistics

2. Інформаційно-аналітична довідка про надзвичайні ситуації в Україні, що сталися упродовж 2018–2022 років. URL: https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

3. Коваленко М. М., Сивак В. В. Особливості горіння нафтопродуктів у резервуарах і заходи протипожежного захисту. Пожежна безпека. 2016. Vol. 1. P. 12–18.

4. Грищенко В. В., Кобзев І. С. Аналіз пожежної безпеки об'єктів зберігання нафтопродуктів. Збірник наукових праць Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту. 2015. Vol. 2(30). P. 35–41.

5. Омельченко І. І., Рудик К. М., Матяш В. Г. 2017. Оцінка ризиків виникнення пожеж на резервуарних парках. Вісник Національного університету цивільного захисту України 26, 91–97.

6. Горбатюк М. В., Гладкий Р. В., Лещенко І. І. Методи забезпечення безпеки при пожежах на резервуарах з нафтопродуктами. Проблеми пожежної безпеки. 2018. Vol. 43. P. 22–28.

7. Шевченко С. В., Андрющенко Д. В., Мартинюк І. О. Проблеми та перспективи вдосконалення системи пожежної безпеки на резервуарних парках. Техногенна безпека. 2019. Vol. 2. P. 57–62.

8. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами: дис. канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД. Львів, 121 с.

9. Wang J., Jin T., Xue J. Mechanical behavior of oil storage tanks exposed to fire: Thermal analysis and structural response. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 153. P. 307–315.

10. Zhang W., Zhang L., Luo X., Qiu J. Experimental and numerical investigation on the fire resistance of steel storage tanks with different liquid levels. Fire Safety Journal. 2016. Vol. 82. P. 70–80.

11. Yu X., Li Y., Bai H. Numerical simulation of thermal and structural response of large oil storage tanks under fire conditions. Engineering Failure Analysis. 2020. Vol. 115. P. 104620.

12. Marzocca D., Hooper S., Budny D. Structural analysis of welded joints in large storage tanks exposed to blast loads. International Journal of Pressure Vessels and Piping. 2017. Vol. 155. P. 48–57.

13. Belytschko T., Tsay C. S. A stabilized co-rotational finite element for nonlinear analysis of structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1981. Vol. 17(5). P. 632–664. doi: 10.1002/nme.1620170508

14. Несух М. М., Субота А. В., Швиденко А. В., Некора О. В. Дослідження процесів руйнування зварних з'єднань в умовах відриву корпусу вертикальних сталевих резервуарів від днища під час пожежі. Municipal Economy of Cities. 2024. Vol. 4(185). P. 186–196. doi: 10.33042/2522-1809-2024-4-185-186-196

15. Несух М. М. Експериментальне дослідження міцності зварних з'єднань при відриві вертикальних сталевих резервуарів від днища під час пожежі. Вісті Донецького гірничого інституту. 2024. Vol. № 1(54), P. 92–103. doi: 10.31474/1999-981X-2024-1-92-103

16. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics. Reports on Progress in Physics. 2005. Vol. 68(8). P. 1703–1759.

17. Benson D., Ponzio R. Computational Analysis of Airbag Deployment Using LS-DYNA. Journal of Engineering Simulation. 2016. Vol. 7(3). P. 15–28.

18. Monaghan J. J., Gingold R. A. Shock simulation by the particle method SPH. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 1983 Vol. 181(3). P. 375–389.

***M. Nesukh*[1]**, *Senior Lecturer*
***A. Subota*[1]**, *PhD, Associate Professor of the Department*
***A. Shvydenko*[2]**, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
***Olga Nekora*[3]**, *PhD, Senior Researcher, Leading Researcher*
[1]*State University of Infrastructure and Technologies, Cherkasy, Ukraine*
[2]*Cherkasy State Business College, Cherkasy, Ukraine*
[3]*National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*

DYNAMIC PROCESSES DURING SEPARATION OF A TANK FROM THE BOTTOM AS A RESULT OF A FIRE

The patterns of changes in the parameters of the movement of a part of a tank after separation from the bottom depending on its design parameters and the conditions of its filling were studied. Based on the conducted studies, a mathematical model of the separation process of a part of a tank was formed, which takes into account both geometric and physical nonlinearities of the material. The methods of mathematical modeling, numerical analysis and computer simulation were used for the selected study. Mathematical models allow for an accurate description of the stress-strain state, and numerical methods, in particular finite element and smoothed particle (SPH) methods, provide accurate modeling of the interaction between structural elements and the liquid. Numerical experiments were conducted using the LS-DYNA software package, which made it possible to determine the main parameters of the separation process, such as the maximum stresses in the welded joint zone and the distribution of deformations in the tank material. The results of numerical modeling showed that the main destruction occurs precisely in welded joints, due to the lower strength of the seam compared to the main tank material. This is consistent with the experimental data obtained in laboratory conditions. For a more detailed analysis, a full factorial experiment and regression analysis were conducted, which allowed us to identify the key factors that affect the separation process and establish empirical relationships between the load, material and geometry parameters of the samples. The constructed regression model demonstrates a high correlation between the selected factors and the separation parameters of the tank. The results obtained can be used to predict the behavior of steel tanks during a fire and develop recommendations to improve their safety and strength, taking into account the conditions of real operational loads.

Keywords: tank detachment, welded joint, fire, numerical modeling, factorial experiment, finite elements, regression analysis

References

1. World Fire Statistics 2011-2023. (2024). CTIF. Retrieved March, 5. Available at: https://www.ctif.org/world-fire-statistics
2. Information and analytical report on emergency situations in Ukraine that occurred during 2018-2022. (2024). State Emergency Service of Ukraine. Retrieved March 5. Available at: https://dsns.gov.ua/uk/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik
3. Kovalenko, M. M., Syvak, V. V. (2016). Features of combustion of petroleum products in tanks and fire protection measures. Fire Safety, 1, 12–18.
4. Gryshchenko, V. V., Kobzev, I. S. (2015). Analysis of fire safety of oil product storage facilities. Scientific Journal of the Ukrainian Research Institute of Civil Protection, 2(30), 35–41.
5. Omelchenko, I. I., Ruddik, K. M., Matyash, V. H. (2017). Risk assessment of fires at tank farms. Bulletin of the National University of Civil Protection of Ukraine, 26, 91–97.
6. Horbatiuk, M. V., Hladkyi, R. V., Leshchenko, I. I. (2018). Methods of ensuring safety during fires at petroleum storage tanks. Problems of Fire Safety, 43, 22–28.
7. Shevchenko, S. V., Andryushchenko, D. V., Martynyuk, I. O. (2019). Problems and prospects of improving the fire safety system at tank farms. Technogenic

© М. М. Несух, А. В. Субота, А. В. Швиденко, О. В. Некора

Safety, 2, 57–62.

8. Chernetsky, V. V. (2015). Influence of thermal factors of fire on the integrity of vertical steel tanks with petroleum products (Candidate of Technical Sciences Dissertation). Lviv State University of Life Safety.

9. Wang, J., Jin, T., Xue, J. (2019). Mechanical behavior of oil storage tanks exposed to fire: Thermal analysis and structural response. Journal of Constructional Steel Research, 153, 307–315. doi: 10.1016/j.jcsr.2019.04.008

10. Zhang, W., Zhang, L., Luo, X., Qiu, J. (2016). Experimental and numerical investigation on the fire resistance of steel storage tanks with different liquid levels. Fire Safety Journal, 82, 70–80. doi: 10.1016/j.firesaf.2016.05.003

11. Yu, X., Li, Y., Bai, H. (2020). Numerical simulation of thermal and structural response of large oil storage tanks under fire conditions. Engineering Failure Analysis, 115, 104620. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104620

12. Marzocca, D., Hooper, S., Budny, D. (2017). Structural analysis of welded joints in large storage tanks exposed to blast loads. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 155, 48–57. doi: 10.1016/j.ijpvp.2017.07.008

13. Belytschko, T., Tsay, C. S. (1981). A stabilized co-rotational finite element for non-linear analysis of structures. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 17(5), 632–664. doi: 10.1002/nme.1620170508

14. Nesukh, M. M., Subota, A. V., Shvidenko, A. V., Nekora, O. V. (2024). Investigation of the processes of destruction of welded joints during the detachment of the vertical steel tank body from the bottom during a fire. Municipal Economy of Cities, 4(185), 186–196. doi: 10.33042/2522-1809-2024-4-185-186-196

15. Nesukh, M. M. (2024). Experimental study of the strength of welded joints during the detachment of vertical steel tanks from the bottom during a fire. Visnyk of Donetsk Mining Institute, 1(54), 92–103. doi: 10.31474/1999-981X-2024-1-92-103

16. Monaghan, J. J. (2005). Smoothed particle hydrodynamics. Reports on Progress in Physics, 68(8), 1703–1759. doi: 10.1088/0034-4885/68/8/R04

17. Benson, D., Ponzio, R. (2016). Computational analysis of airbag deployment using LS-DYNA. Journal of Engineering Simulation, 7(3), 15–28.

18. Monaghan, J. J., Gingold, R. A. (1983). Shock simulation by the particle method SPH. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 181(3), 375–389. doi: 10.1093/mnras/181.3.375

Надійшла до редколегії: 10.10.2024
Прийнята до друку: 13.11.2024

УДК 699.8

І. В. Толок, *к.пед.н., доцент, ректор (ORCID 0000-0001-6309-9608)*
Є. О. Рибка, *д.т.н., професор, т.в.о. проректора (ORCID 0000-0002-5396-5151)*
С. В. Поздєєв, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-9085-0513)*
М. В. Кустов, *д.т.н., професор, нач. наук. від. (ORCID 0000-0002-6960-6399)*
А. Ю. Новгородченко, *PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0003-2347-093X)*
Ю. В. Пліско, *ст. методист факультету (ORCID 0009-0005-9526-1119)*
Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОВЕДІНКИ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МОДУЛЬНИХ УКРИТТІВ В УМОВАХ ВИБУХУ

Наведені результати математичного моделювання впливу вибуху та отриманого напружено-деформованого стану у залізобетонних конструкціях модульного укриття. А також встановлено відповідність укриттів умовам безпеки, що вимагаються діючими нормами України. Для цього було досліджено поведінку огороджувальних конструкцій наземних модульних укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання, що гарантує безпеку людей, які знаходяться всередині укриттів та їх захисту від наслідків повітряних обстрілів. В науковому дослідженні були отримані результати, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху під час ворожих обстрілів. Результати дослідження були отримані завдяки розробці нового підходу щодо розрахунків, заснованих на застосуванні величини бойового заряду відповідного снаряду у тротиловому еквіваленті, дистанції вибуху та положення точки, де відбувається вибух. Відповідні розрахунки були використані в програмному комплексі LS-DYNA, де математично описувалась поведінка залізобетонних конструкцій укриття в умовах навантаження, також використовувалися математичні співвідношення теорій міцності й пластичності. І визначений тиск за даними параметрами може бути застосований для вивчення його впливу на конструкції. Були отримані результати математичного моделювання поведінки захисних укриттів в умовах вибуху, які дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху. Реалізація результатів дослідження це представлення технічних пропозицій щодо модульних укриттів для захисту населення від уражень, спричинених бойовими діями.

Ключові слова: модульне укриття, залізобетонні конструкції, напружено-деформований стан, математичне моделювання, вплив вибухів

1. Вступ

В сучасних умовах при веденні бойових дій в Україні гостро постає проблема функціонування модульних укриттів в умовах обстрілів та дослідження впливу вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів від ймовірних обстрілів. Тому є актуальним питанням дослідження поведінки конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху та проведення відповідних розрахунків.

Ефективність захисних укриттів під час ворожих обстрілів є здатність їхніх будівельних конструкцій зберігати свої огороджувальні функції в умовах бойових дій, блокувати вплив вражаючих факторів з причини авіаційних, ракетних та артилерійських обстрілів, а також захищати від ураження людей уламками та осколками будівельних конструкцій. А також забезпечувати можливість безпечної евакуації людей з укриттів після руйнування будівельних конструкцій об'єктів, що знаходяться поряд із ними, у зв'язку із влучання в них бойових снарядів. У даних умовах вкрай необхідне вивчення поведінки огороджувальних конструкцій захисних споруд та укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання, та гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів.

© І. В. Толок, Є. О. Рибка, С. В. Поздєєв, М. В. Кустов та ін.

Це є актуальним питанням, адже сучасна будівельна галузь та досвід зарубіжних підходів свідчать про можливість використання наземних захисних укриттів модульного типу, перевагою яких є зменшення часу укриття населення під час ворожих ударів. Результати роботи стануть передумовою для подальших досліджень в частині обґрунтування конструктивних параметрів приміщень безпеки житлових і громадських будівель в умовах воєнного стану. Також стануть в нагоді для проєктних організацій під час проєктування захисних споруд цивільного захисту та наглядових органів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Конструювання модульних захисних укриттів в Україні є дуже актуальною темою, проте це питання малодосліджене і дані відомості щодо проєктування чи розрахункових методик є закриті від загалу. В роботах [1, 2] наведено основні результати досліджень щодо забезпечення вимог об'ємно-планувальних рішень та розглянуті перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. Проте залишається невирішені питання, пов'язані з формуванням захисних властивостей та критеріїв не лише для підземних захисних споруд, а також потрібно конкретно визначити ці критерії для наземних укриттів. Причинами цього може бути те, що до повномасштабного вторгнення здебільшого використовувалися підземні захисні споруди.

Варіантом подолання відповідних недоліків є активізація питання дослідження та проєктування наземних модульних укриттів. Цікавий підхід використаний в роботі [3], де захисне укриття призначене для внутрішнього захисту приміщень і може бути використане як для індивідуального користування, так і для загального користування цивільним населенням та військовими. Основною інновацією якого є можливість швидкого розгортання укриття однією людиною без використання додаткових інструментів чи зусиль, що робить його ідеальним для швидкого реагування в критичних ситуаціях. Проте в даному досліджені не розглядаються модульні захисні укриття, які влаштовуються на вулиці з масовим перебуванням людей для забезпечення їхнього захисту під час повітряних обстрілів.

Більш детально наземні модульні укриття досліджуються в роботі [4], так само як наші розроблені укриття прості й надійні, мають низькі витрати на його зведення та високу швидкість монтажу, тому що містить корпус, виконаний з однотипних панельних модулів. Однак недостатньо досліджено вплив вибуху на модульні укриття і збереження цілісності залізобетонних конструкцій даних укриттів. Причиною цього може бути те, що у даних умовах експериментальне дослідження безпеки захисних укриттів є утрудненим з огляду на їх високу вартість, трудомісткість та підвищену небезпеку. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого сучасним методам математичного моделювання, що дозволяє дослідити всі фізико-механічні процеси, які відбуваються у конструкціях укриттів під час вибухів.

3. Мета та завдання дослідження.

Метою дослідження є визначення закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів, що встановлюються безпосередньо на грунт, в умовах вибуху під час повітряних обстрілів при веденні бойових дій на території України.

Для виконання цієї мети поставлені такі завдання дослідження:

1. Обґрунтувати математичні моделі поведінки залізобетонних конструкцій

укриттів в умовах вибуху.

2. Розробити методику числового експерименту щодо впливу вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів.

4. Матеріали та методи дослідження.

Об'єкт дослідження – функціонування модульного укриття в умовах обстрілів. Предмет дослідження – вплив вибуху на залізобетонні конструкції модульних укриттів від ймовірних обстрілів. Гіпотеза – наявність закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів, які встановлюються безпосередньо на грунт, в умовах вибуху під час повітряних обстрілів, що забезпечить безпеку практичного використання модульних укриттів відповідно до діючих вимог [5, 6]. В роботі використано методи комплексного аналізу щодо оцінювання наслідків від надлишкового тиску вибуху військових засобів ураження та методи математичного моделювання на основі явного методу інтегрування рівнянь динаміки і рівнянь напружено-деформованого стану твердого тіла при їх апроксимації за методом кінцевих елементів у нелінійній постановці.

Для практичної реалізації обґрунтованих математичних моделей під час проведення розрахунків було використано комп'ютерна система LS-DYNA Вона підходить для нашого дослідження, тому що призначена для моделювання імпульсних впливів на конструктивні системи й моделювання результату цих впливів з використанням рівнянь динаміки в кінцево-елементній реалізації, контролю контакту й зусиль відклику на контактну взаємодію за допомогою методу штрафних функцій, динамічного перебудування сітки кінцевих елементів при її резонінгу й поділу на окремі частини, здатні до подальшої контактної взаємодії. Можливості LS-DYNA для опису властивостей залізобетону дозволяють використання як суцільного матеріалу з арматурними включенням, так і додаткову умову анізотропії й модифікованої міцності матеріалу, розподілене по всьому об'єму. Також є можливість представлення арматурних стержнів за допомогою окремих типів елементів – балкових або об'ємних. Істотною перевагою системи LS-DYNA є те, що елементи різних типів не обов'язково повинні сполучатися у спільних вузлах, що суттєво спрощує побудову кінцево-елементних схем.

Згідно із [5] захисні властивості захисних споруд виражаються такими основними критеріями як надмірний тиск повітряної ударної хвилі, ступінь послаблення (коефіцієнт захисту $К_з$). Залежно від зазначених критеріїв захисні споруди поділяються на класи сховищ та групи протирадіаційних укриттів, зазначені в табл. 1 і 2 [7].

Табл. 1. Класи сховищ

№	Клас сховища	Надмірний тиск повітряної ударної хвилі $\Delta P_ф$, кПа	Ступінь послаблення (коефіцієнт захисту $К_з$)
1	А-I	500	5000
2	А-II	300	3000
3	А-III	200	5000
4	А-IV	100	1000

Настановами щодо проєктування захисних споруд, що рекомендуються у нормах [5, 6], чинних в Україні, у якості основного впливу визначається надлишковий тиск ударної хвилі. Даний тиск визначається як довідникова величина і є силовим фактором що прикладається до поверхонь будівельних конструкцій бомбосховища. При цьому для врахування динамічності прикладання навантаження застосовуються відповідні коефіцієнти. Даний підхід є дещо застарілим, оскільки

для розрахунку використовує квазістатичний підхід. Для більш точного описання пропонується застосовувати більш фізично обґрунтований підхід, що заснований на застосуванні величини бойового заряду відповідного снаряду у тротиловому еквіваленті, дистанції вибуху та положення точки, де відбувається вибух. Визначений тиск за даними параметрами може бути використаний для вивчення його впливу на конструкції [6, 7].

Табл. 2. Група протирадіаційного укриття

№	Група ПРУ	Надмірний тиск повітряної ударної хвилі $\Delta P_ф$, кПа	Ступінь послаблення (коефіцієнт захисту $K_з$)
1	П-1	100	1000
2	П-2	20	500
3	П-3	-	500
4	П-4	20	200
5	П-5	-	200
6	П-6	-	100

Запропоновані модульні укриття складається із двох вхідних отворів (металеві двері) та залізобетонної капсули, яка конструюється з модульних блоків, які з'єднані між собою за допомогою зварювання закладних деталей. Такі блоки встановлюють на ґрунт без фундаментних та підкріплювальних конструкцій. Конструктивна схема укриття у вигляді ізометричної проєкції наведена на рис. 1.

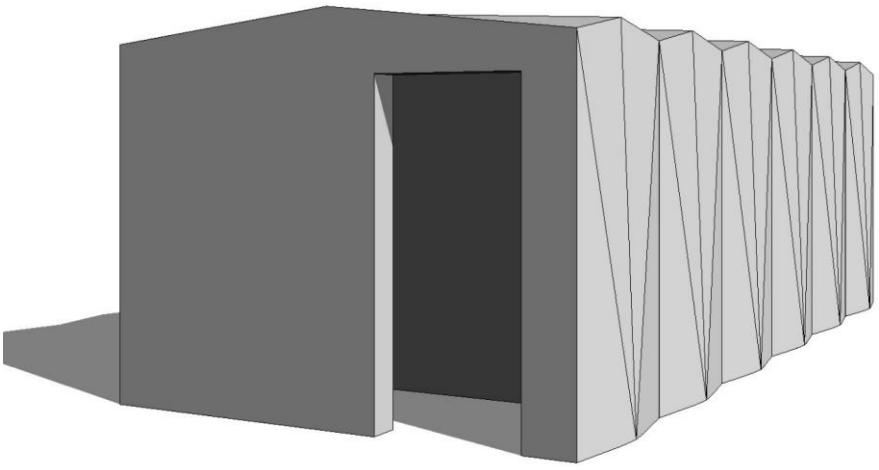


Рис. 1. Конструктивна схема укриття

Запропонована конструктивна система модульного укриття дозволяє забезпечувати його захисні функції в умовах вибуху без руйнування або перекидання його залізобетонних блоків.

5. Визначення закономірностей поведінки залізобетонних конструкцій наземних модульних укриттів в умовах вибуху

5.1. Обґрунтування математичної моделі поведінки залізобетонних конструкцій укриттів в умовах вибуху

Для моделювання впливу вибуху та відповідного напружено-деформованого стану у залізобетонних конструкціях модульних укриттів в умовах вибуху, був застосований узагальнений інженерний підхід, який показаний в табл. 3 [8].

В програмному комплексі LS-DYNA математичний опис феноменології поведінки матеріалу в умовах навантаження (змінюється від нуля до значень, які

можуть бути порівнянні із граничними, або перевищувати їх) називається математичною моделлю або просто моделлю матеріалу. Сюди входять математичні співвідношення теорій міцності й пластичності.

Табл. 3. Узагальнений інженерний підхід розрахунку

№	Особливості механічних процесів	Математична модель або методи
1.	Напружено-деформований стан твердого тіла.	Інтегрування рівнянь динаміки та рівнянь напружено-деформованого стану за допомогою метода кінцевих елементів
2.	Моделювання бетонної основи та шару грунту блоків укриття.	Застосування тривимірних масивних кінцевих елементів гексаедричної форми із вісьмома вузлами
3.	Моделювання сталевих пластинчастих елементів системи анкерування та елементів дверей.	Використання двовимірних оболонкових кінцевих елементів прямокутної форми із чотирма вузлами та п’ятьма точками інтегрування
4.	Моделювання сталевої арматури у вигляді арматурних стержнів.	Використання одновимірних лінійних елементів із визначеною формою перерізу, стержньові балкові елементи
5.	Описання нелінійної поведінки бетону в умовах діючих навантажень.	Застосування пластичної моделі ушкодженого бетону, яка будується на основі нелінійних діаграм деформування із спадними гілками
6.	Моделювання нелінійної поведінки грунту.	Застосування моделі Друкера – Прагера
7.	Взаємодія між поверхнями спирання залізобетонних блоків захисного укриття на грунт.	Використання моделі контактної взаємодії
8.	Моделювання вибуху і визначення зміни тиску на стінки залізобетонних блоків укриттів.	Застосування моделі Тейлора
9.	Програмний код для процесу випробування зразка	Використання комп’ютерної системи LS-DYNA є частиною комплексу розрахункових інженерних систем ANSYS Workbench і також входить як блок в окрему частину цього комплексу ANSYS APDL

При описанні бетону використана модель неперервної поверхні руйнування з обмежуючим куполом, що має номенклатурне позначення в системі LS-DYNA як CSCM type № 159 (Continuous Surface Cap Model), яка описана на роботах Murray, Abu-Odeh і Bligh [9, 10]. Основною особливістю даної моделі є те, що комбінації напружень, при якому матеріал здатний опиратися, обмежені особливою поверхнею, яка скомпонована з поверхні текучості й крихкого руйнування. Тобто дана поверхня охоплює всі випадки руйнування бетону комплексно й установлює тим самим умови або крихкого або в’язкого руйнування.

5.2. Розробка методики числового експерименту щодо впливу вибуху на залізобетонні укриття

На рис. 2 показано декілька варіантів розташування епіцентру вибуху: посередині бокової поверхні укриття, на торці збоку входу в укриття та над верхньою плитою укриття [7, 9].

Після проведення всіх розрахунків, відповідно розроблених методик, була отримана кінцево-елементна схема укриття наведена на рис. 3. На даній схемі відображена кінцево-елементна дискретизація всіх компонентів-частин математичної моделі укриття [8, 10].

© І. В. Толок, Є. О. Рибка, С. В. Поздєєв, М. В. Кустов та ін.

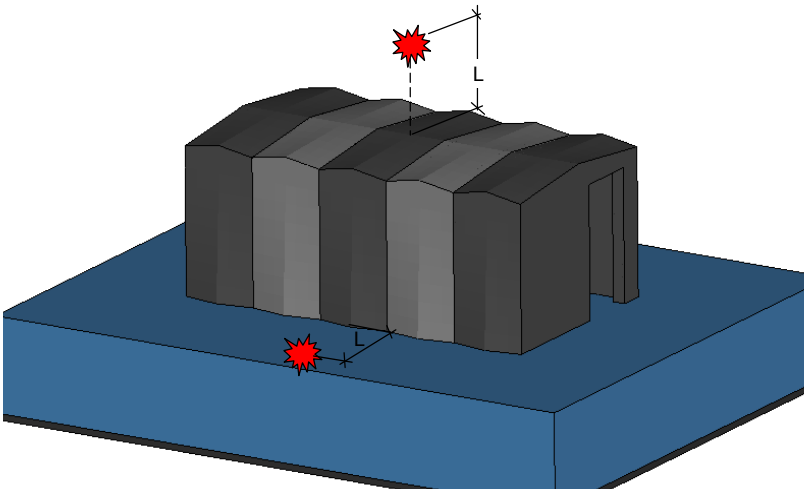


Рис. 2. Схеми різних варіантів розташування епіцентру вибуху

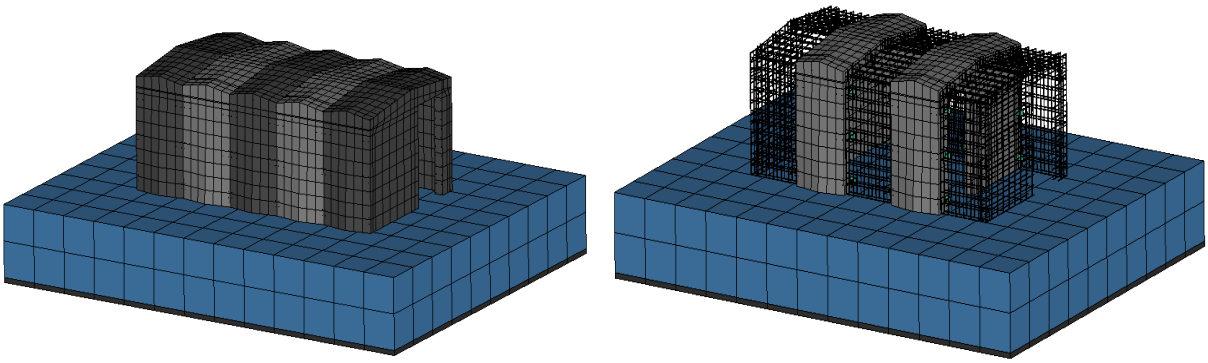


Рис. 3. Кінцево-елементна схема компонентів укриття

Отримані результати дозволяють дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху. Для вивчення механізмів руйнування або втрати цілісності було досліджено вплив вибуху за сценаріями, поданими на рис. 2 із максимально небезпечним сполученням параметрів вибуху із тротиловим еквівалентом заряду 30 кг, та мінімальною дистанцією від епіцентру вибуху до поверхні огородження укриття 0,5 м. За таких умов максимальний тиск на поверхню огородження захисного укриття та поверхню ґрунту складає 56,4 МПа.

Для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано картину розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з боку бічної сторони укриття, детально показана на рис. 4 [11].

Також для аналізу напружено-деформованого стану було побудовано картину розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині, що зображено на рис. 5 [12, 13].

Аналіз отриманих результатів показує, що під впливом вибуху грунт не спучився, металеві двері не деформувалися, а залізобетонні блоки не піднімалися на певну висоту над ґрунтом. Роз'єднання залізобетонних блоків не відбулося унаслідок руйнування болтових з'єднань. Також, можна зазначити, що вплив вибухової хвилі призводить до руйнування самих бетонних блоків.

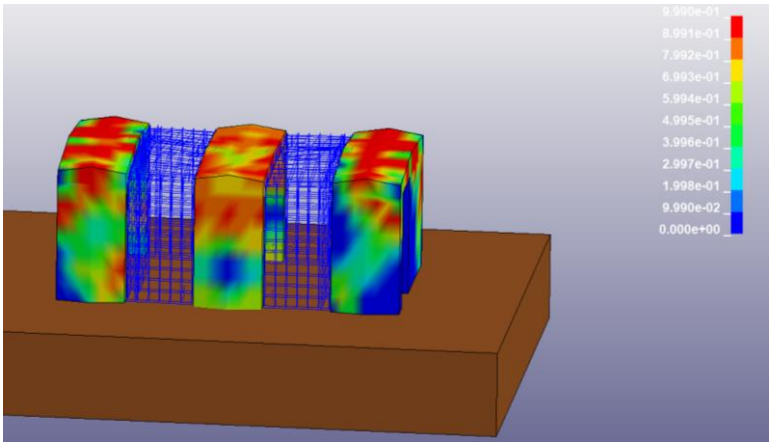


Рис. 4. Розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі (m(TNT) = 30 кг, L = 0,5 м. p_{max} = 56,4 МПа) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований з боку бічної сторони укриття

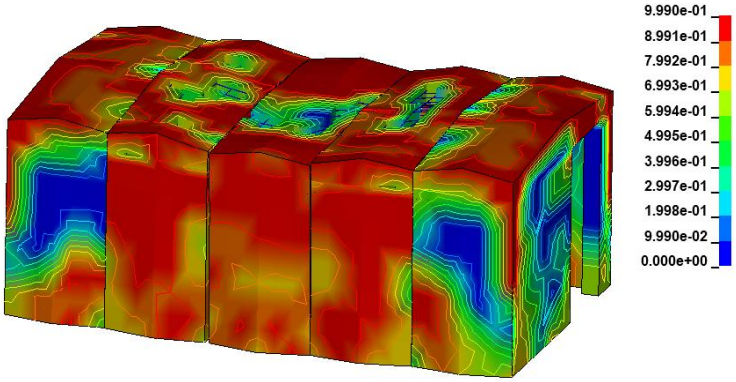


Рис. 5. Розподілення пластичних деформацій після прикладення тиску від вибухової хвилі (m(TNT) = 30 кг, L = 0,5 м, p_{max} = 56,4 МПа) до поверхні конструкцій укриття для сценарію, коли епіцентр вибуху розташований над верхньою горизонтальною поверхнею укриття посередині

Різниця характеру руйнування укриття зумовлена тим, що укриття вільно опирається на грунт. І кінетична енергія, надана елементам системи, витрачається не на їх деструкцію, а на надання їм імпульсу, що призводить до їх руху. Тому виявлено, що найбільш небезпечні сценарії це вплив вибуху на бокову та верхню горизонтальну поверхні укриття.

6. Обговорення результатів дослідження поведінки залізобетонних конструкцій модульних укриттів в умовах вибуху

За результатами аналізу конструктивних систем захисних укриттів було обґрунтовані основні положення та припущення розрахунково-теоретичного підходу щодо математичного моделювання впливу вибуху на залізобетонних будівельних конструкцій захисних споруд розроблених укриттів модульного типу, які детально показані в табл. 3. Були обґрунтовані розрахункові схеми та набір математичних моделей механічної взаємодії між елементами захисних укриттів, матеріалів конструкцій та грунту, на яких вони встановлюються, а також моделі механічного впливу вибуху на ґрунті та елементи укриття, наведені на рис. 1 – рис. 3. На основі проведеного математичного моделювання зроблено висновок про безпеку захисних укриттів запропонованої конструкції при їх практичному застосуванні для захисту від вибухів та проникаючого іонізуючого випромінювання.

© І. В. Толок, Є. О. Рибка, С. В. Поздєєв, М. В. Кустов та ін.

Відповідно розрахунків запропонована конструктивна система модульного укриття дозволяє забезпечувати його захисні функції в умовах вибуху без руйнування або перекидання його залізобетонних блоків. Тому дане укриття за своїми захисними функціями (зберігання міцності, цілісності та відсутність перекидання або інших суттєвих переміщень) забезпечує вимоги чинних норм України до захисних споруд, що встановлюють необхідний рівень захисту. Дані модульні укриття є безпечними при їх практичному використані для захисту населення від впливу вибухів із надлишкового тиску 100 кПа (10 тс/м^2) та маси вибухівки 10 кг у TNT еквіваленті під час повітряних обстрілів, а також проникаючого іонізуючого випромінювання.

Ефективність даного математичного моделювання полягає в розробці математичного апарату розрахунку впливу вибуху з різних сторін на конструкції модульних укриттів, що в свою чергу є не такий трудомісткий і дороговартісний метод, ніж натурні випробування, реальні умови яких важко забезпечити в умовах війни в Україні. Варто зазначити, що є потреба подальших наукових досліджень, таких як залежність захисних властивостей огороджувальних конструкцій модульних укриттів від характеристик заряду сучасних військових засобів ураження для удосконалення розрахунків даного математичного моделювання. Таким чином, було отримано результати, які дозволять в майбутньому дослідити механізми руйнування або втрати цілісності конструкцій укриття і встановити взаємозв'язок даних аспектів із забезпеченням виконання його захисних функцій в умовах впливу вибуху.

7. Висновки

1. Дослідження та обґрунтування математичних моделей поведінки конструкцій укриттів при вибуху дало можливість встановити, що руйнівна здатність сучасних військових засобів ураження залежить від їх характеристик заряду бойової частини, який може бути виражений в тротиловому еквіваленті. Захисні властивості огороджувальних конструкцій захисних споруд цивільного захисту залежать від матеріалу, з якого виконані такі огороджувальні конструкції та його товщини. Варто зазначити, що залежність захисних властивостей огороджувальних конструкцій захисних укриттів цивільного захисту від характеристик заряду сучасних військових засобів ураження, потребує подальших наукових досліджень.

2. За допомогою розробки методики числового експерименту щодо впливу вибуху на модульні укриття було встановлено відповідності модульних укриттів даної конструкції умовам безпеки, що висувається діючими нормами, чинними в Україні. Також змодельовано поведінку огороджувальних конструкцій модульних укриттів в умовах впливів вибухів та дії проникаючого іонізуючого випромінювання щодо гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів. В дослідженні проаналізовано та систематизовано впливи від бойових зарядів на конструкції укриттів і запропоновано формалізувати та описувати їх за моделлю ударної хвилі сферичної форми з відповідністю її до стандартних значень надлишкового тиску вибуху. Запропоновано для розрахунку деформування конструкцій укриття і ґрунту використовувати комплекс математичних моделей на основі апроксимації диференціальних рівнянь напружено-деформованого стану методу кінцевих елементів у реалізації за явним методом. За результатами проведених досліджень було встановлено, що захисні укриття запропонованої конструкції є безпечними при їх практичному використанні для захисту населення від впливу вибухів із надлишкового тиску 100 кПа

(10 тс/м^2) та маси вибухівки 10 кг у TNT еквіваленті під час повітряних обстрілів, а також проникаючого іонізуючого випромінювання для гарантування безпеки людей, що знаходяться всередині при їх захисті від наслідків повітряних обстрілів.

Література

1. Некора В., Ніжник В., Поздєєв С., Луценко Ю., Михайлов В. Особливості та перспективи ефективного функціонування захисних споруд цивільного захисту в умовах бойових дій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2023. Вип. 1(15). С. 149–157. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15). С. 149–157

2. Спосіб влаштування захисної споруди (укриття) в населених пунктах для захисту цивільного населення: пат. 154965 Україна E04H9/00. № u202301260; заяв. 27.03.2023; опубл. 10.01.2024, Бюл. № 2/2024. 2 с. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1779578/

3. Багатоцільове мобільне збірно-розбірне захисне укриття: пат. 156538 Україна. E04H9/00. № u202303385;заяв. 10.07.2023; опубл. 10.07.2024, Бюл. № 28/2024. 5 с. URL: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1808189/

4. Модульне захисне укриття: пат. 153093 Україна. E04H9/00. № u202204625 заяв. 07.12.2022; опубл. 17.05.2023, Бюл. № 20/2023. 5 с. UA 153093 https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1736942/

5. ДСТУ 9195:2022 «Швидкоспоруджувані захисні споруди цивільного захисту модульного типу». Чинний від 06 грудня 2022 р. Вид. офіц. Київ ДП «УкрНДНЦ», 2023. 15 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99454.

6. ДБН В.2.2-5:2023 «Захисні споруди цивільного захисту». Чинний від 01.11.2023. Вид. офіц. Київ Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666

7. Гетун Г., Безклубенко І., Соломін А., Баліна О. Особливості об'ємно-планувальних рішень захисних споруд цивільного захисту. Сучасні проблеми Архітектури та Містобудування. 2023. Вип. 67. С. 203–220. doi: 10.32347/2077-3455.2023.67.203-220

8. Novhorodchenko A., Shnal T., Yakovchuk R., Tur N. The study of the behavior of reinforced concrete structures of modular shelter in conditions of explosion. Proceedings of CEE 2023 Civil and Environmental Engineering and Architecture. Springer/Rzeszów, Poland. 2023. P 286–295. URL: https://www.springerprofessional.de/En/the-study-of-the-behavior-of-reinforced-concrete-structures-of-m/26223376

9. Murray Y.D., A. Abu-Odeh R. Bligh Evaluation of concrete material model 159, FHWA-HRT-05-063. 2007. P. 209. URL: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/05063/05063.pdf

10. Hallquist J.O. LS-DYNA Theory Manual, Livermore software technology corporation: Livermore California / Copyright, USA March, 2006. 680 p. URL: https://www.egr.msu.edu/decs/sites/default/files/content/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf

11. Jonsson P., Jonsén P., Andreasson P., Lundström T., Hellström J. Modelling dam break evolution over a wet bed with smoothed particle hydrodynamics: A Parameter Study. JOURNAL NAME: Engineering. 2015. Vol. 7. № 5. P. 248–260. doi: 10.4236/eng.2015.75022

12. Bakeer T. Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden. 2009. URL:

https://www.researchgate.net/publication/200634854_Collapse_Analysis_of_Masonry_Structures_under_Earthquake_Actions

13. Aagaard B. T., Knepley M. G., Williams C. A. A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2013. P. 3059–3079. doi: 10.1002/jgrb.50217

I. Tolok, *PhD, Associate Professor, Rector*
E. Rybka, *DSc, Professor, Acting Vice-Rector*
S. Pozdieiev, *DSc, Professor, Professor of the Department*
M. Kustov, *DSc, Professor, Deputy Head of Department*
A. Novhorodchenko, *PhD, Lecturer of the Department*
Y. Plisko, *Senior Methodologist of the Faculty*
National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

BEHAVIOR PATTERNS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF MODULAR SHELTERS IN EXPLOSION CONDITIONS

The results of mathematical modeling of the impact of the explosion and the resulting stress-strain state in reinforced concrete structures of a modular shelter are presented. The compliance of the shelters with the safety conditions required by the current standards of Ukraine is also established. For this purpose, the behavior of the enclosing structures of ground modular shelters under the effects of explosions and the action of penetrating ionizing radiation was investigated, which guarantees the safety of people inside the shelters and their protection from the effects of air strikes. The scientific study obtained results that allow investigating the mechanisms of destruction or loss of integrity of shelter structures and establishing the relationship between these aspects and ensuring the performance of its protective functions under the effects of an explosion during enemy shelling. The results of the study were obtained through the development of a new approach to calculations based on the use of the warhead of the corresponding projectile in TNT equivalent, the explosion distance and the position of the point where the explosion occurs. The corresponding calculations were used in the LS-DYNA software package, where the behavior of reinforced concrete shelter structures under load conditions was mathematically described, and mathematical relations of strength and plasticity theories were also used. And the pressure determined by these parameters can be used to study its impact on structures. The results of mathematical modeling of the behavior of protective shelters under explosion conditions were obtained, which allow us to investigate the mechanisms of destruction or loss of integrity of shelter structures and establish the relationship of these aspects with ensuring the performance of its protective functions under the influence of an explosion. The implementation of the research results is the presentation of technical proposals for modular shelters to protect the population from damage caused by combat operations.

Keywords: modular shelter, reinforced concrete structures, stress-strain state, mathematical modeling, impact of explosions

References

1. Nekora, V., Nizhnik, V., Pozdyeyev, S., Lucenko, Yu., Mihajlov, V. (2023). Osoblivosti ta perspektivi efektivnogo funkcionuvannya zahisnih sporud civi-lnogo zahistu v umovah bojovih dij. Naukovij visnik: Civilnij zahist ta po-zhezhna bezpeka, (1(15), 149–157. doi: 10.33269/nvcz.2023.1(15). C. 149–157.

2. Sposib vlashtuvannya zahisnoyi sporudi (ukrittya) v naselenih punktah dlya zahistu civilnogo naselennya: pat. 154965 Ukrayina E04H9/00. № u202301260; zayav. 27.03.2023; opubl. 10.01.2024, Bul. № 2/2024. 2 Available at: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1779578/

3. Bagatocilove mobilne zbirno-rozbirne zahisne ukrittya: pat. 156538 Ukrayina. E04H9/00. № u202303385;zayav. 10.07.2023; opubl. 10.07.2024, Bul. № 28/2024. 5 Available at: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1808189/

4. Modulne zahisne ukrittya: pat. 153093 Ukrayina. E04H9/00. № u202204625 zayav. 07.12.2022; opubl. 17.05.2023, Byul. № 20/2023. 5 s. UA 153093 Available at: https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1736942/

5. DSTU 9195:2022 “Quickly constructed protective structures of civil defense of modular type”. Effective from December 6, 2022. Official publication. Kyiv SE “UkrNDNTS”. (2023), 15. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=99454

6. DBN V.2.2-5:2023 "Civil defense protective structures". Effective from 01.11.2023. Official publication. Kyiv Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=104666

7. Getun, G., Bezklubenko, I., Solomin, A., & Balina, O. (2023). Peculiarities of spatial planning solutions for civil defense protective structures. Modern Problems of Architecture and Urban Planning, (67), 203–220 doi: 10.32347/2077-3455.2023.67.203-220

8. Novhorodchenko, A., Shnal, T., Yakovchuk, R., Tur, N. (2023) The study of the behavior of reinforced concrete structures of modular shelter in conditions of explosion. Proceedings of CEE 2023 Civil and Environmental Engineering and Architecture. Springer/Rzeszów, Poland, 286–295. Available at: https://www.springerprofessional.de/En/the-study-of-the-behavior-of-reinforced-concrete-structures-of-m/26223376

9. Murray, Y. D., A. Abu-Odeh, R. Bligh. (2007). Evaluation of concrete material model 159, FHWA-HRT-05-063, 209. Available at: https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/05063/05063.pdf

10. Hallquist, J. O. (2006). LS-DYNA Theory Manual, Livermore software technology corporation: Livermore California / Copyright, USA March, p. 680 Available at: https://www.egr.msu.edu/decs/sites/default/files/content/ls-dyna_theory_manual_2006.pdf

11. Jonsson, P., Jonsén, P., Andreasson, P., Lundström, T., Hellström, J. (2015). Modelling dam break evolution over a wet bed with smoothed particle hydrodynamics: A Parameter Study. JOURNAL NAME: Engineering, 7(5), 248–260. doi: 10.4236/eng.2015.75022

12. Bakeer, T. (2009). Collapse analysis of masonry structures under earthquake actions. Publication Series of the Chair of Structural Design, TU Dresden. Available at: https://www.researchgate.net/publication/200634854_Collapse_Analysis_of_Masonry_Structures_under_Earthquake_Actions

13. Aagaard, B. T., Knepley, M. G., Williams, C. A. (2013). A domain decomposition approach to implementing fault slip in finite-element models of quasi-static and dynamic crustal deformation. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 3059–3079. doi: 10.1002/jgrb.50217

Надійшла до редколегії: 07.10.2024
Прийнята до друку: 16.11.2024

УДК 351.861

В. В. Тютюник*[1]*, *д.т.н., професор, нач. каф. (ORCID 0000-0001-5394-6367)*
О. А. Лєвтєров*[1]*, *д.т.н., професор, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5926-7146)*
О. О. Тютюник*[2]*, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-3330-8920)*
Д. В. Усачов*[1]*, *ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1140-9798)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*
[2]*Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків, Україна*

АКУСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ДЖЕРЕЛ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ЗАСТУВАННЯМ ВОГНЕПАЛЬНОЇ ЗБРОЇ

Удосконалено метод ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї на основі використання середньої характеристики акустичного спектру пострілу, шляхом визначення характеристичних частот з максимальними значеннями амплітуд, який полягає у визначенні характеристичних частот за умов перевищення порогового рівня амплітуд гармонік прийнятого сигналу, визначення енергії такого спектра, віднімання енергії еталонного спектра від енергій експериментально отриманих спектрів пострілів. Застосування удосконаленого методу для дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів з пістолету Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолету «Форт-14Р» та автомату АК-74 калібру 5,45 мм дозволило з ймовірністю 0,95 ідентифікувати тип вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом. За результатами досліджень розроблено функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу. Схема втілює у себе медіанний фільтр, смугові фільтри, блок характеристичних частот пострілів, блок кодування, блок декодерів та блок логічних елементів «Кон'юнкція». Процес ідентифікації полягає в аналізі 18-розрядного коду за 6 групами по 3 розряди, на виході за результатами обробки з'являється відповідна комбінація сигналів, яка визначає приналежність до певного типу зброї та/або її наявність в базі відомих зразків. На основі схеми апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу встановлені особливості розробки та функціонування геоінформаційної системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї.

Ключові слова: моніторинг, ідентифікація, акустичний сигнал, фільтрація сигналів, спектральний аналіз, амплітудно-частотна характеристика

1. Вступ

Для захисту міст України від актуальних загроз необхідно створити комплексну систему безпеки «SAFE CITY», яка забезпечить надійну взаємодію між усіма компонентами та покриє широкий спектр захисних напрямів: від політичної й економічної стабільності до інформаційної, соціальної та екологічної безпеки. Ця система сприятиме своєчасному виявленню й усуненню загроз, а також попередженню ризиків у всіх важливих аспектах життєдіяльності міста [1].

Терористична активність охоплює такі аспекти, як: 1) підготовка й здійснення терактів; 2) спонукання до насильницьких дій або фізичний вплив на людей і організації; 3) формування й підтримка незаконних збройних угруповань для виконання терористичних завдань; 4) вербування, озброєння й підготовка бойовиків; 5) пропаганда ідеології тероризму; 6) фінансування та інша підтримка терористичних структур [2].

Всі ці складові терористичної діяльності невід'ємно пов'язані із незаконним зберіганням та використанням вогнепальної зброї. Наприклад, за останні декілька років серед надзвичайних ситуацій різного характеру, які виникли в світі, існує значна їх кількість з використанням вогнепальної зброї, серед яких є стрілянини.

Так, в супермаркеті Walmart в місті Чесапік (штат Вірджинія, США) повідомляється про велику кількість поранених та загибель до десяти людей (листопад 2022 року) [3]; в готелі у центрі Львова (Україна) обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [4]. Під час зборів членів об'єднання Valleverde, яке займається управлінням будинку в районі водосховища Турано поблизу Рима (Італія) стався терористичний акт. В результаті троє загиблих та четверо поранених [5]. Біля лісу на Закарпатті (Україна) обійшлося без жертв (грудень 2022 року) [6]; в центрі Парижа (Франція) загинуло троє людей, ще декілька поранено (грудень 2022 року) [7].

У школі Де-Мойна (штат Айова, США) внаслідок стрілянини загинули двоє учнів (січень 2023 року) [8]; у посольстві Азербайджану в Тегерані (Іран) чоловік з автоматом Калашникова убив одного охоронця дипломатичного представництва і ще двох поранив (січень 2023 року) [9].

У січні 2023 року під час святкування китайського Нового року в Лос-Анджелесі (Каліфорнія, США) трагічно загинули щонайменше десять осіб [10]; у місті Лейкленд (штат Флорида, США) сталася чергова масова стрілянина, внаслідок якої троє людей загинули, а ще семеро отримали травми різного ступеня тяжкості та були госпіталізовані (січень 2023 року).

У лютому 2023 року в університеті американського містечка Іст-Лансінг (штат Мічиган, США) через дії озброєного чоловіка загинули троє студентів та п'ятеро поранено [12]. У прибережному місті Хаф-Мун-Бей, що розташоване приблизно за 50 км на південь від Сан-Франциско (штат Каліфорнія, США), озброєний чоловік скоїв напад, внаслідок якого загинуло семеро людей (лютий 2023 року) [13].

У грудні 2023 року у центрі Праги (Чехія) чоловік відкрив стрілянину в будівлі Карлового університету, що призвело до загибелі 14 осіб та поранення 26 людей. Пізніше ще один постраждалий помер у лікарні. Серед поранених були троє іноземних громадян, нападник закінчив життя самогубством [14].

У січні 2024 року у районі м. Сариєр у Стамбулі, під час служби в італійській церкві Санта-Марія, сталася стрілянина, внаслідок якої одна людина отримала смертельне поранення [15]. У грузинському місті Руставі (Грузія), озброєний чоловік відкрив стрілянину на місцевому ринку, внаслідок стрілянини загинуло четверо людей (лютий 2024 року) [16].

У Детройті (штат Мічиган, США) під час стрілянини в парку були поранені 9 осіб, нападник під'їхав до парку, наблизився до майданчика і здійснив 28 пострілів, кілька разів зупиняючись для перезарядки [17]. У вересні 2024 року у місті Віндер (штат Джорджія, США) у старшій школі Апалачі 14-річний підліток відкрив стрілянину, що призвело до загибелі чотирьох людей і поранення ще дев'яти осіб [18]; на Тернопільщині (Україна) військовий біля сільської школи розстріляв людей, загинуло двоє людей, ще трьох з важкими пораненнями доправили до лікарні [19].

Виходячи зі статистичних даних наведених небезпечних подій, бачимо, що на сьогодні процес виявлення факту використанням вогнепальної зброї та проходження інформації про місце виникнення, тип зброї та наслідки від надзвичайних ситуацій (НС) в існуючих системах безпеки відбувається в ручному режимі, з відповідно великою інерційністю та низкою достовірністю. Це підкреслює нагальну потребу в інтеграції до системи «SAFE CITY» різних компонентів територіальної автоматизованої системи моніторингу надзвичайних ситуацій та ситуаційних центрів, що мають тісний взаємозв'язок на рівні інформаційної взаємодії та управління. Така інтеграція сприятиме прийняттю оперативних антикризових рішень для виконання завдань із

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

виявлення, ідентифікації, запобігання та ліквідації терористичних дій, пов'язаних із незаконним обігом та застосуванням вогнепальної зброї.

Необхідність проведення цих наукових досліджень зумовлена рішенням Ради національної безпеки і оборони України щодо розширення та розвитку загальної мережі ситуаційних центрів. Ця мережа включатиме Головний ситуаційний центр України, Урядовий ситуаційний центр, ситуаційні центри установ сектору безпеки і оборони, центральних органів виконавчої влади, Ради міністрів Автономної Республіки Крим, обласних, Київської та Севастопольської міських державних адміністрацій, а також резервні й мобільні ситуаційні центри.

Водночас, порівняно з відеофіксацією, яка є основним джерелом інформації для роботи ситуаційних центрів у державі, звукова ідентифікація джерел терористичних небезпек, які пов'язані із незаконним використанням вогнепальної зброї, має ряд суттєвих переваг, а саме результат вимірювань мало залежить від положення мікрофона відносно стрільця та від факторів видимості та розміру зброї. Саме тому удосконалення методів дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналіз літературних джерел та Інтернет-ресурсів [21–33] показує, що новітні методи та засоби дослідження акустичних характеристик небезпечних джерел можна об'єднати у два основні кластери.

До першого кластеру відносяться високоточні лабораторні методи, загальними показниками яких є прецизійність, вибірковість та висока чутливість вимірювань. Інструментальна реалізація цих методів спрямована на розв'язання проблеми високоточної акустичної ідентифікації за пострілом типу вогнепальної зброї для розширення можливостей криміналістичної експертизи. Так, у роботі [21] представлені результати відносно високої результативності (до 90 % достовірної ідентифікації) інструментальної реалізації методів машинного навчання у визначеності категорії, калібру та моделі зброї, що використовувалась на місці злочину, лише за звуком її пострілу. Але ці підходи потребують проведення в лабораторних умовах строгого аналізу акустичного сигналу, з додатковими процесами щодо підготовки лабораторних замірів. Тому, ці методи потребують додаткових досліджень щодо їх реалізації для експрес-аналізу (проведення ідентифікації у режимі on-line) джерел терористичних небезпек, які пов'язані із незаконним використанням вогнепальної зброї на території держави.

До другого кластеру відносяться засоби для проведення вимірювання в реальних умовах експлуатації. Ці засоби не характеризуються такими високими показниками вимірювань як лабораторні засоби, хоча здійснюють контроль акустичного простору у автоматичному режимі. Так, у електронних ресурсах [22–32] представлені основні автоматизовані мобільні засоби акустичного моніторингу пострілів на відкритих площадках, які на сьогодні функціонують в розвитих країнах світу.

Базуючись на аналізі наведених джерел встановлено, що основними функціональними призначеннями цих мобільних засобів акустичного моніторингу пострілів є: по-перше, індивідуальне застосування у якості елементів військового спорядження або у якості засобів додаткового технічного оснащення індивідуальної вогнепальної зброї; по-друге, групове застосування у якості систем для оснащення транспортних засобів.

Основними розробниками даних приладів є ряд світових компаній. Так, компанія Rheinmetall Defence Electronics розробила акустичну систему локалізації

стрілка ASLS (Acoustic Shooter Locating System) для підвищення рівня захисту екіпажу машини. Антени цієї системи складаються із восьми спеціальних мікрофонів, створених для високих рівнів звукового тиску і забезпечують кругове покриття. Точність виявлення пострілу за дальністю становить ±10 %. Кутова точність виявлення під час зупинки і під час руху становлять відповідно менше 2° і 5°. Частота оновлення інформації складає менше 1,5 с [24]. Але ймовірність визначення типу вогнепальної зброї є недостатньою.

Мініатюрна версія системи AkSL (Akustusches Schützen-Lokalisationssystem) представляє собою акустичний сенсорний блок для носіння на плечі, який дозволяє під час руху військовослужбовця зберігати у пам'яті інформацію щодо місця виникнення загрози, при цьому інформацію щодо азимуту, вертикального кута і дальності на дисплеї наручних часів. На дисплеї також присутня схема локалізації, її орієнтація, час небезпечної події та заряд батареї. Система AkSL забезпечує точність за азимутом ±5°, за дальністю ±10 % і має масу поряд 500 г та максимальну дальність виявлення, яка на 20 % більше за далекобійність зброї, що вистрілила [25].

Компанія Raytheon BBN розробила локатор пострілів Boomerang, можливості якого дозволяють визначати положення стрільця з точністю до 15° протягом 1 с після пострілу на відстані до 30 м. Boomerang встановлюється на щоглі в задній частині автомобіля і складається з семи невеликих мікрофонів, які сканують звук з невеликою різницею у часі. Використання спеціального алгоритму дозволяю визначити напрямок пулі та дальність до стрілка. Система працює на зміцненому лептопі з ОС Windows та забезпечує локалізацію стрілка шляхом використання 10-розрядної координатної сітки. Система використовує електронні карти місцевості для відображення потенційно небезпечного сектору [26].

Крім того, компанією AAI Textron розроблено систему PDCue (Projectile Detection and Cueing – визначення пострілу та сигналізація) для транспортних засобів, яка базується на установлених по кутам даху (що забезпечує повне покриття акустичного простору на 360°) чотирьох сенсорах.

Похибка визначення пострілу по кутам азимуту та місця становить порядку ±1°, похибка за дальністю – менше 25 % та зменшується на дальності більше 350 м. Максимальна дальність ефективного контролю становить 1,2 км [27].

В свою чергу, компанією Acoem-Metravib представлено пристрій Pearl Personal Equipment Add-on for Reactive Localization – доповнення до особистого спорядження для реакційної локалізації), який призначено для забезпечення військовослужбовця відносно дешевою системою виявлення та локалізації пострілу кулеметів, штурмових та снайперських гвинтівок. Пристрій включає мініатюрну акустичну матрицю чутливих елементів, процесорний блок з гірометром і людино-машинний інтерфейсом, який показує напрямок пострілу за азимутом та кутом місця за допомогою зелених та червоних світлодіодів. Ймовірність виявлення пострілу більше 95 %, похибка локалізації за азимутом та кутом місця становить ±10° і за дальністю ±20°, час реакції менше однієї секунди [28].

Також компанія пропонує систему Pilarw для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів, яка дозволяє у реальному масштабі часу визначати місце джерела вогню не тільки стрілецької зброї, але й ручних протитанкових гранатометів, мінометів та протитанкових ракет. Оновлений варіант для транспортних засобів Pilarw Vehicle має час реакції менше двох секунд та забезпечує точність за азимутом ±2° під час стоянки і ±5° під час руху. Точність за кутом місця становить ±5°, точність за дальністю – від 10 до 20 % [29].

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

Нідерландська компанія Microflown Avisa розробила інноваційні акустичні векторні сенсори AVS (Acoustic Vector Sensor) для визначення та локалізації пострілів стрілецької зброї, вогню артилерії, повітряних суден та транспортних засобів. Система на базі AVS дозволяє ідентифікувати місце мінометного пострілу з точністю 2 % за дальністю та менше 5° за азимутом [30].

Пристрій Sniper Egg – моноблочний гвинтівковий локатор пострілу, розроблений компанією Ultra Electronics для встановлення з правої сторони гвинтівки. Локатор має масу 450 г та дисплей 160x128 пікселів у якості людино-машинного інтерфейсу. Номінальна точність за азимутом та кутом міста становить ±5°, а за дальністю 15 % (на дисплеї відображається інформація щодо кількості подій та дистанція). Дальність виявлення становить від 30 до 1200 м. У компанії Ultra Electronics заявили про ймовірність виявлення та локалізації більше 90 % при низькій частоті помилкових сигналів. Для плавності переміщення графічних елементів на дисплеї частота його оновлення становить 10 Гц [31].

Американська компанія Cobham разом з компанією BioMimetic Systems (BMS) розробила різні варіанта акустичної системи виявлення пострілів PinPoint для спішної піхоти, а також для транспортних засобів та стаціонарних об'єктів. Варіант системи для спішної піхоти PinPoint Dismount розроблено у формі плечового блоку датчиків, які вимірюють дальність, напрямок і вертикальний кут. Інформація представляється у вигляді звукового повідомлення або виводиться на дисплей наручних часів. Цей варіант обладнано спеціальним алгоритмом обробки інформації, що дозволяє виявляти і показувати постріли кожні 30 мс. Система може зберігати у пам'яті до 1000 пострілів, а кожен піхотинець може спостерігати за останніми 15 пострілами. Варіант системи для транспортних засобів PinPoint Vehicle має схожі характеристики стосовно часу аналізу, але більш вищу точність виявлення, що обумовлено використанням більш крупного загального сенсору розмірами 337x356x108 мм і масою 2,27 кг. Для відображення використовується зміцнений планшет з ОС Windows і можливістю підключення до системи Ethernet або радіозв'язку. Ця система також може зберігати у пам'яті до 1000 пострілів, а в машині є можливість відображати інформацію про останні 250 пострілів [32].

Проведений у роботі аналіз дозволяє встановити наступне. Основні автоматизовані мобільні засоби акустичного моніторингу пострілів на відкритих площадках, які на сьогодні функціонують в розвитих країнах світу, спрямовані на встановлення факту пострілу та пеленгації місця знаходження вогнепальної зброї.

В Україні також проводиться ряд досліджень щодо розробки аналогічного локатору джерела пострілу. Так, у статті [33] автори пропонують структурну схему пристрою для локації джерела вогнепальних пострілів, детально описуючи її структуру та принцип роботи прототипу. Наведено пояснення алгоритму запису й обробки звукових сигналів, а також представлені результати лабораторних випробувань прото типу й оцінка ефективності похибки пеленгування приладу. Але у представленому прототипі локатору джерела пострілу також не розглядається можливість багатофакторного аналізу отриманих акустичних сигналів та ідентифікації джерела небезпеки, шляхом використання методів штучного інтелекту.

Зважаючи на вищенаведене, одним із розвиваючих напрямків розвитку системи «SAFE CITY» є розповсюдження методу спектрального аналізу акустичних коливань для розробки інтелектуальної системи, що забезпечуватиме моніторинг надзвичайних ситуацій терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів.

Для досягнення ймовірності 0,95 стосовно ідентифікації типу вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом необхідно вдосконалення існуючих методів дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розвиток науково-технічних основ акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї.

Для досягнення мети потрібно виконати наступні завдання:

1) дослідити особливості роботи системи акустичного моніторингу надзвичайних ситуацій терористичного характеру, пов'язаних із незаконним застосуванням вогнепальної зброї, в умовах міської території;

2) удосконалити метод ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів;

3) розробити функціональну схему апаратної реалізації методу ідентифікації.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єктом дослідження є параметри та характеристики акустичних спектрів пострілів з вогнепальної зброї різного типу.

Предметом дослідження є способи удосконалення методів ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що підвищити ймовірність ідентифікації типу вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом можливо шляхом вдосконалення існуючих методів дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів.

Для визначення шляхів вдосконалення методів дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів було проаналізовано особливості функціонування системи акустичного моніторингу НС на території міста.

Удосконалення методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів базувалося на дослідженнях амплітудно-частотних характеристик звукових хвиль від пострілів з вогнепальної зброї різного типу, для чого було розроблено відповідну лабораторну установку та проведені експериментальні дослідження.

5. Удосконалення методів дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів

5.1. Особливості функціонування системи акустичного моніторингу надзвичайних ситуацій в межах міста

Система акустичного моніторингу НС терористичного характеру включає розміщені в межах міста стаціонарні наземні пристрої для автоматизованого контролю акустичного середовища, центральний ситуаційний центр, підсистему для забезпечення зв'язку та передачі телеметричних даних, а також модуль для виконання антикризових заходів, спрямованих на запобігання, локалізацію та ліквідацію наслідків надзвичайних ситуацій. На рис. 1 представлено функціональну схему цієї системи [1, 2, 34].

Ключовим показником ефективності роботи підсистеми оперативного акустичного моніторингу зони надзвичайних ситуацій у місті є точність визначення джерела загрози за його типом і місцем розташування.

Фактори, що можуть впливати на точність акустичної ідентифікації джерела загрози, можна умовно розділити на три групи. Перша група охоплює фактори,

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

які відображають динамічні зміни параметрів самого джерела загрози. Друга група включає тактико-технічні характеристики засобів контролю акустичного середовища, зокрема метрологічні та експлуатаційні параметри пристроїв для отримання й обробки даних. До третьої групи відносяться географічні й фізико-хімічні особливості місця розташування джерела загрози та властивості середовища, через яке передається акустичний сигнал.

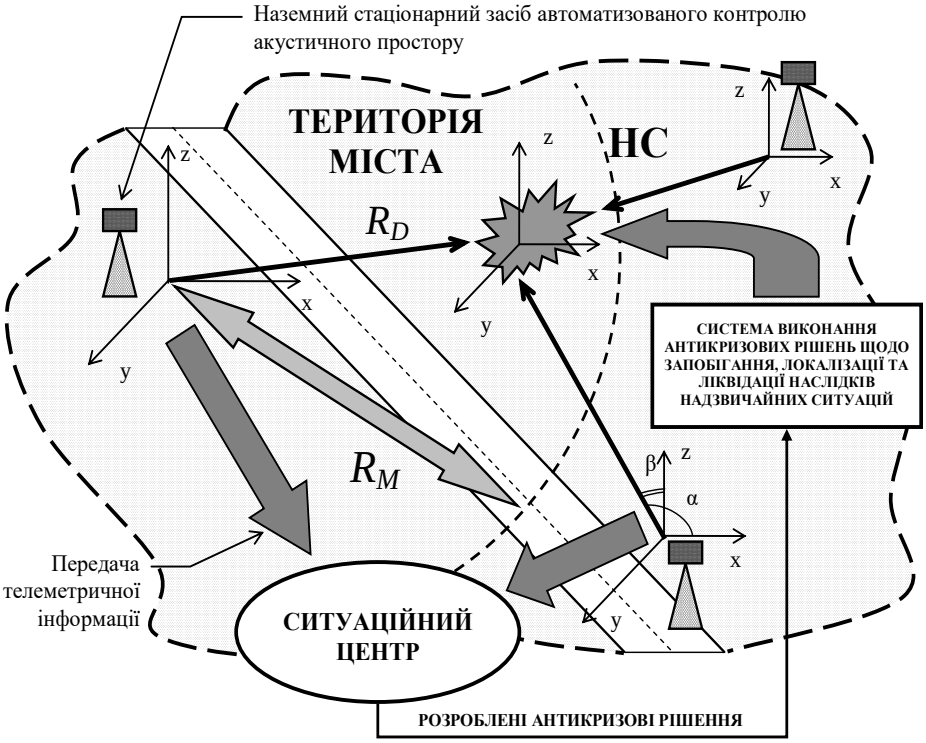


Рис. 1. Схема функціонування на території міста системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру

Нейтральний режим розповсюдження звуку (рис. 2а) характерний для порівняно невеликих відстаней і забезпечується умовами прямої видимості. У точці прийому наземного стаціонарного засобу автоматизованого контролю акустичного середовища відбувається інтерференція прямого звукового променю, що випромінюється джерелом терористичних дій, із променем, відбитим від земної поверхні.

При поширенні звуку від джерела терористичних дій на великі відстані в умовах приземної атмосфери характеристики акустичних хвиль здебільшого залежать від рефракції, що відбувається на градієнтах температури і швидкості вітру. Це призводить до виникнення хвилевидного режиму (рис. 2б) і антихвилевидного режиму (рис. 2в). У першому випадку звукові промені загинаються вниз, багаторазово відбиваючись від земної поверхні, що сприяє збереженню енергії звукової хвилі й забезпечує відносно низький рівень ослаблення звуку.

В іншому випадку звукові промені загинаються вгору, і зона акустичної тіні формується поблизу поверхні Землі на певній відстані від джерела надзвичайної ситуації. У цю зону може проникати лише дуже слабкий звук, розсіяний турбулентними неоднорідностями у верхніх шарах атмосфери. Ці два режими розповсюдження звукових хвиль проявляються в основному на відстанях, що перевищують 1 км.

Разом з тим, територія великого міста відрізняється наявністю складної мережі забудови на значній площі, де нерідко відбуваються локальні атмосферні зміни,

а щільність розташування різнопланових об'єктів, будівель різної висотності, доріг і транспортних шляхів на одиницю площі є дуже високою. Такі умови створюють перешкоди для ефективного прийому акустичних сигналів, які фіксують засоби моніторингу. Таким чином, при організації акустичного моніторингу зони надзвичайної ситуації на території міста, виникає необхідність встановлення засобів контролю акустичного середовища на відстанях не більше 1 км.

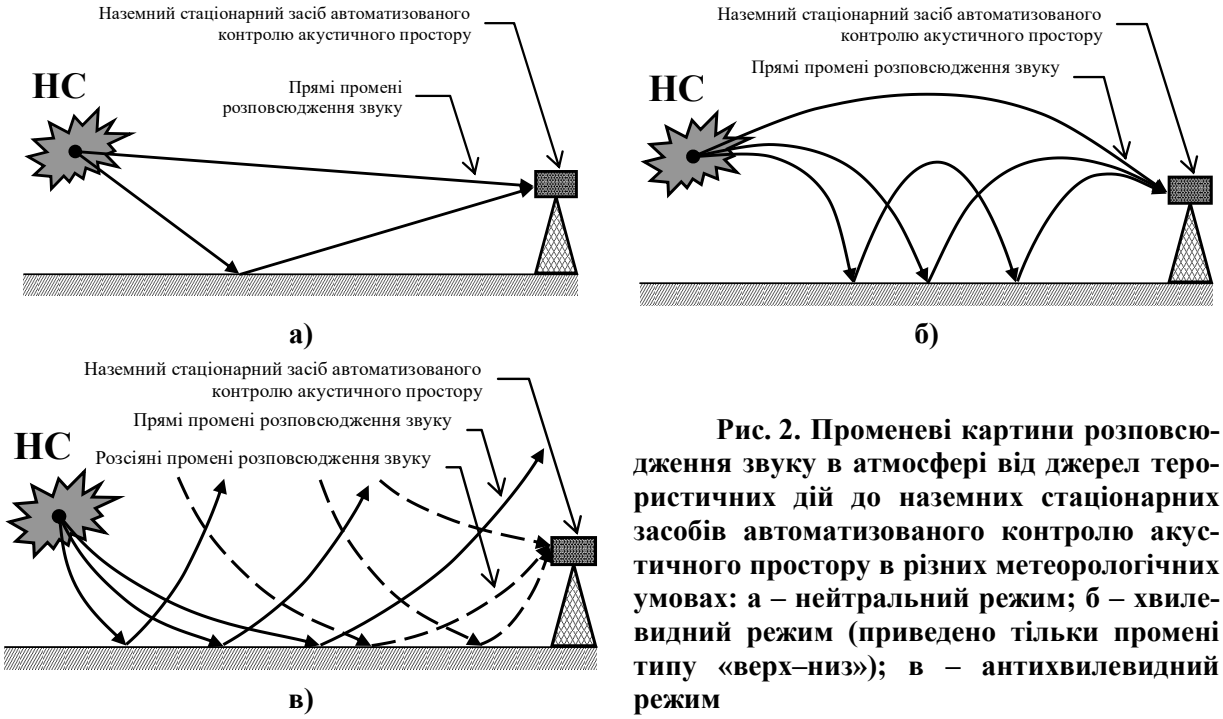


Рис. 2. Променеві картини розповсюдження звуку в атмосфері від джерел терористичних дій до наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору в різних метеорологічних умовах: а – нейтральний режим; б – хвилевидний режим (приведено тільки промені типу «верх–низ»); в – антихвилевидний режим

В цих умовах стає актуальним аналіз ефективності роботи засобів контролю в режимі слабкої рефракції звуку, що передбачає пряме розповсюдження звукових хвиль до точки спостереження. У цьому режимі (рис. 2а) до точки спостереження доходять два промені: один прямий, без точки повороту, та один відбитий від Землі. У такому разі траєкторія звукових променів має незначну кривизну, що полегшує розрахунок звукового тиску, який можна виконати за формулою:

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

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

Рівняння (1) відображає закон збереження енергії та є рівнянням енергетич-

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

ного балансу. Більшість членів у правій частині цього рівняння, за винятком $L_s(f)$, зазвичай мають від'ємне значення. Для забезпечення надійної акустичної ідентифікації джерела терористичних дій і точного визначення місця його виникнення в межах міста необхідно дотримання умов: $R_D \le R_M$.

5.2. Вдосконалення методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї

В основу методу автоматичного виявлення застосування вогнепальної зброї та її типу покладено особливості амплітудно-частотних характеристик за характеристичними частотами акустичних сигналів від пострілів.

Розробка методу базується на дослідженнях амплітудно-частотних характеристик звукових хвиль від пострілів з вогнепальної зброї. Для проведення лабораторних досліджень застосовано лабораторну установку, функціональна схема якої представлена на рис. 3.

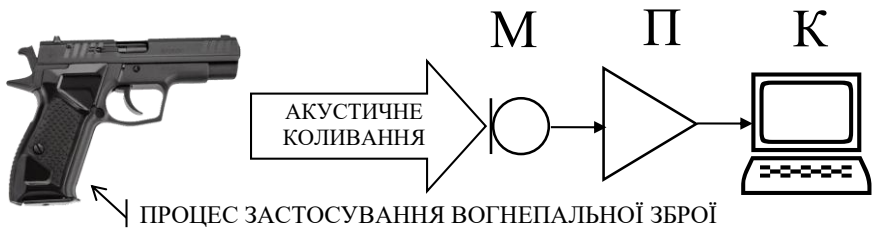


Рис. 3. Схема лабораторної установки: М – мікрофон; П – підсилювач; К – комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням

Під час експерименту були зібрані дані акустичних сигналів пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» 9 мм та автомата АК-74 калібру 5.45 мм, як потенційно можливих пристроїв для здійснення терористичних актів. Амплітудно-частотні характеристики 3-х пострілів з кожного типу пристроїв (пістолет Макарова калібру 9 мм, травматичний пістолет «Форт-14Р» 9 мм та автомат АК-74 калібру 5.45 мм) наведено на рис. 4 – рис. 6.

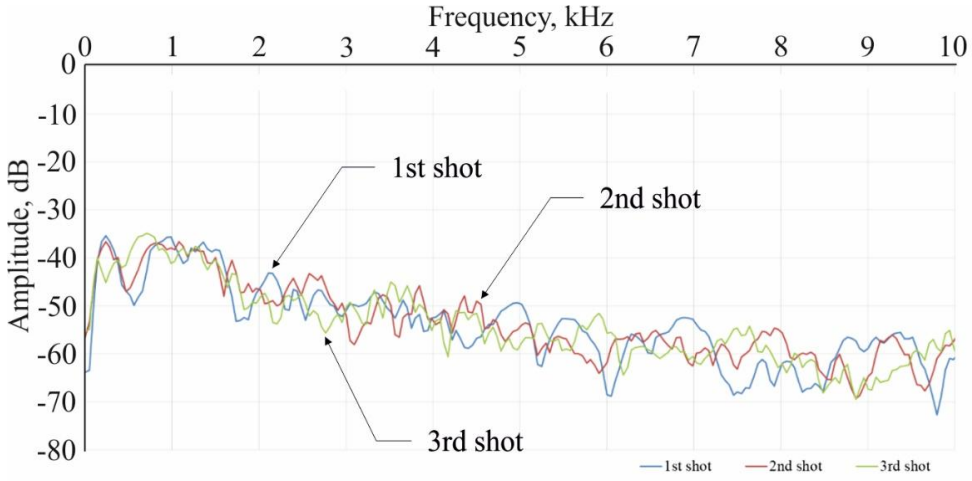


Рис. 4. Спектри пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

За результатами порівняльного аналізу складено середню характеристику акустичного спектру пострілу для трьох типів вогнепальної зброї, шляхом визна-

чення характеристичних частот з максимальними значеннями амплітуд, результати обробки експериментальних даних наведено в табл. 1.

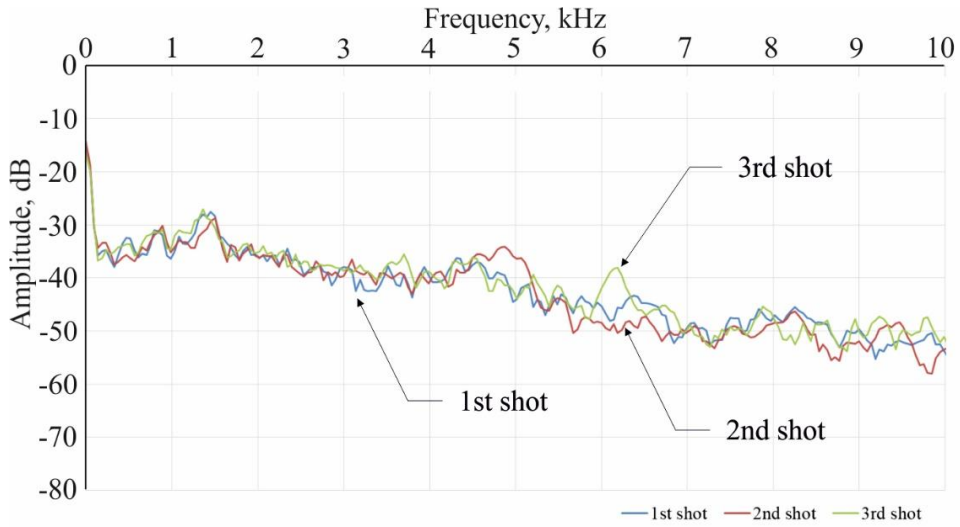


Рис. 5. Спектри пострілів з травматичного пістолета «Форт-14Р»

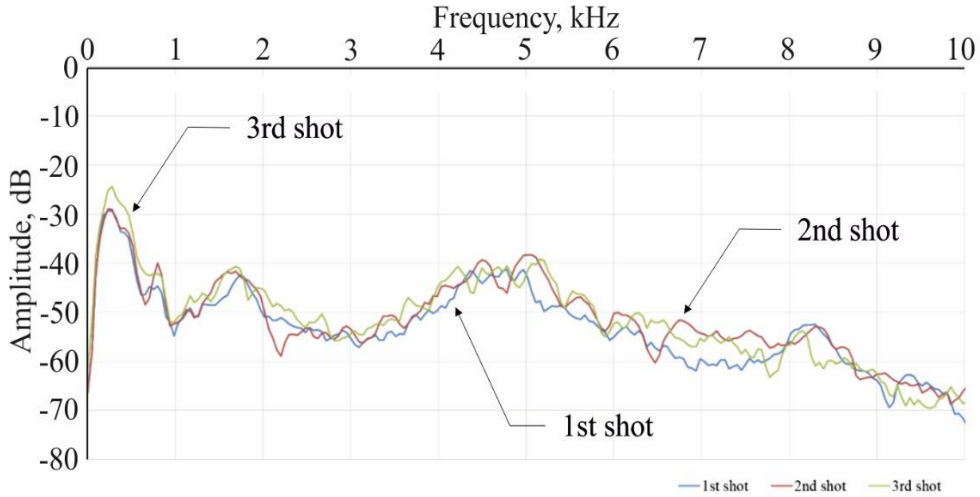


Рис. 6. Спектри пострілів з автомата АК-74 калібру 5.45 мм

Табл. 1. Характеристичні частоти спектрів пострілів досліджуваних зразків вогнепальної зброї

Види зброї	№ пострілу	Характеристичні частоти, кГц					
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
ПМ 9 мм	1	0,4	1,2	2,9	4,1	7,2	10,6
	2	0,8	1,6	2,4	3,9	8,5	11,5
	3	0,4	1,3	3,0	4,0	9,5	12,5
АК-74 5.45 мм	1	1,1	1,8	2,5	5,9	8,8	16,3
	2	1,3	1,9	2,8	3,9	7,9	10,1
	3	1,7	3,2	5,4	8,2	9,9	14,3
Форт-14Р	1	0,9	1,5	2,7	7,2	7,2	10,5
	2	0,6	1,7	2,9	2,9	7,7	11,9
	3	0,8	1,9	3,4	3,4	8,0	14,7

Для ідентифікації пострілу запропоновано наступний алгоритм, представлений на рис. 7, а саме: 1) виділення «корисного» сигналу на фоні перешкод (фільтрування); 2) отримання частотного (спектрального) опису отриманого сигна-

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

лу; 3) визначення характеристичних частот (частоти з амплітудою, що перевищує встановлене порогове значення (рис. 8) отриманого сигналу; 4) порівняння отриманих результатів з базою даних щодо ідентифікації вогнепальної зброї.

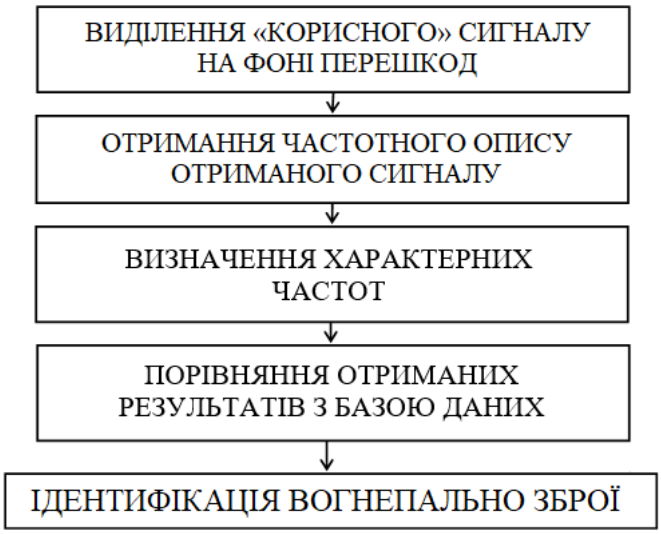


Рис. 7. Алгоритм ідентифікації різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів

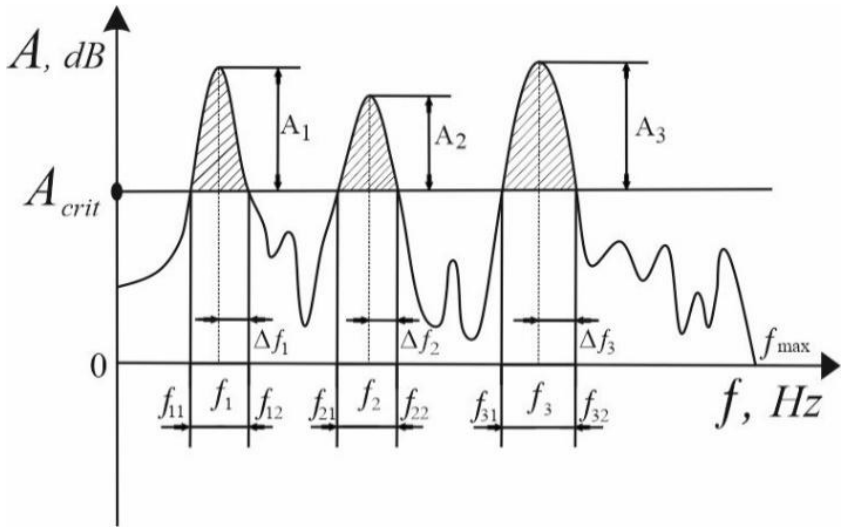


Рис. 8. Визначення характеристичних частот спектру пострілу та визначення енергії спектра на відповідних гармоніках: A_i – амплітуда і-ї гармоніки спектру; f_i – частота і-ї гармоніки спектру; Δf_i – допустимий діапазон коливання частоти і-ї гармоніки спектру прийнятого сигналу (див. табл. 1); A_{crit} – встановлене порогове значення для амплітуд гармонік спектру (визначається на основі статистичних даних прийнятих сигналів для різних типів зброї)

Кількість частот, амплітуда яких перевищує встановлене порогове значення, визначається як:

$$K_{ex} = \left\{ A_S''(f) = 0 \middle| \operatorname{sign}\left(A_S''(f_i)\right) > 0 \right\},$$

де $A_S(f)$ – функція огинаючої спектру прийнятого сигналу.

Для кожного типу зброї енергія спектра прийнятого сигналу перевищуючого порогове значення визначається як:

$$E_{crit}(f) = \int_0^{f_{max}} A_{crit}(f)df,$$

де $A_{crit}(f)$ – функція огинаючої спектру перевищуючого порогове значення.

Процес ідентифікації зброї відбувається за умови:

$$E_{crit} \le \int_{f_{1.1}}^{f_{1,2}} A_1(f)df + \int_{f_{2.1}}^{f_{2,2}} A_2(f)df + ... \int_{f_{n.1}}^{f_{n,2}} A_n(f)df$$

Для згладжування спектру та забезпечення відповідної точності і надійності ідентифікації вогнепальної зброї за показником енергії спектра прийнятого сигналу перевищуючого порогове значення у роботі використано вагову функцію вікна Хеммінга, яка допомагає зменшити спотворення, що виникають через розриви спектру сигналу, та має вигляд:

$$w(n) = 0{,}54 - 0{,}46\cos(2\pi n / N - 1),$$

де $w(n)$ – значення вікна Хеммінга для відліку n, N – кількість відліків у сигналі, n – індекс відліку, $n = 1, 2, ..., N - 1$.

Застосування вікна Хеммінга до сигналу $x(n)$ проводилось покомпонентним множенням кожного відліку на відповідне значення вікна, а саме: $x_n(n) = x(n) \cdot w(n)$, де $x_n(n)$ – значення вихідного сигналу для відліку n, який оброблено вікном Хеммінга, $x(n)$ – значення вхідного сигналу для відліку n.

При обробці отриманих акустичних сигналів пострілів з однієї і тієї зброї спостерігаються зміщення (відхилення) акустичних спектральних характеристик (рис. 9). Ці зміщення виникають внаслідок факторів, таких як: зміни умов навколишнього середовища, невизначеності в методиках вимірювань, а також випадкові або систематичні помилки. При більш детальному визначенні акустичного спектру пострілів слід враховувати різні параметри, такі як маса кулі, кількість пороху в патроні, швидкість кулі при вильоті із ствола, довжина та температура ствола тощо.

В результаті серії пострілів можна спостерігати, що спектри зсуваються у частотному діапазоні на незначну величину. Ми припускаємо, що допустиме відхилення Δf_i для ідентифікації спектрів дорівнює 5 % $(\Delta f_i = 0{,}05 f_i)$.

Вплив зовнішніх факторів на акустичний спектр пострілу є важливим завданням дослідження. Це може бути корисним для визначення характеристик зброї за його особливостями акустичного спектру пострілу, а також для аналізу акустичного оточення в бойових умовах.

Одним із найбільш значущих факторів, що впливає на відповідні характеристики спектрів звуку пострілів зі стрілецької зброї, є температура ствола. При пострілі пороховий заряд перетворюється на гази та високотемпературні продукти згоряння. Ці гази створюють сильний тиск, необхідний для виштовхування кулі через ствол. В результаті відбувається значне нагрівання ствола, що може суттєво впливати на характеристики звукового спектру.

За результатами низки досліджень і аналізу спектрів, можна відзначити, що акустичні параметри трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р», автомата АК-74 калібру 5,45 мм відрізняються. Проте, на окремих частотних діапазонах спектру є певна схожість (рис. 10–12).

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

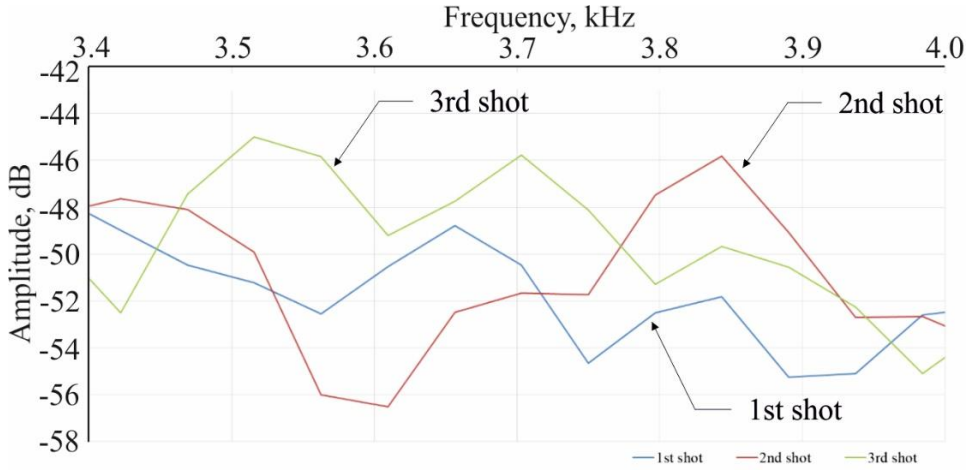


Рис. 9. Зміщення у спектральних характеристиках пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм

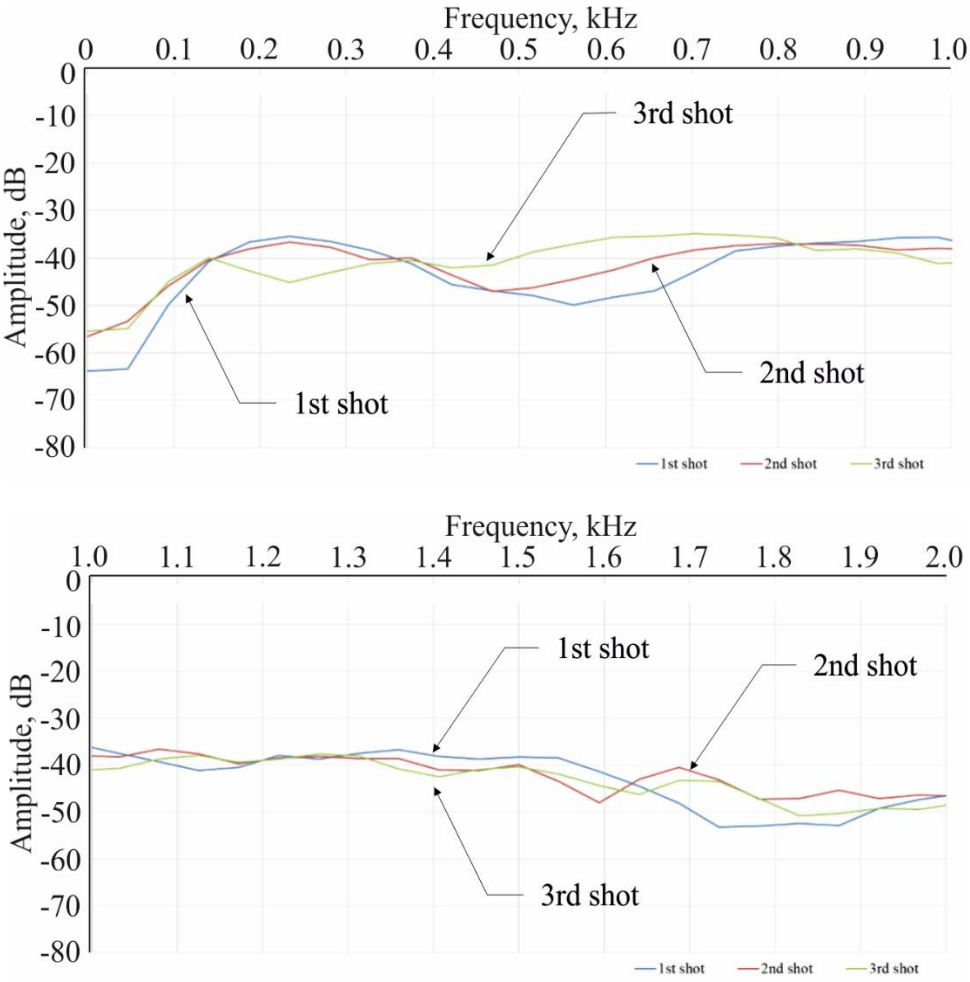


Рис. 10. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів пістолета Макарова калібру 9 мм

Під час експерименту для фільтрації сигналів використана порогова амплітуда, для визначення характеристичних частот, на яких амплітуда сигналу перевищує встановлене порогове значення. У разі позитивного результату частота зберігається, в іншому випадку вона відкидається. Цей процес повторюється для всього діапазону частот. Ідентифікація процесу використання вогнепальної зброї відбувається за рахунок встановлення певної кількість збігів між отриманим та

еталонними спектрами. При виявленні чотирьох або більше збігів можна вважати, що даний спектр відповідає з ймовірністю не менше 80 % еталонному. При цьому, точність визначення становить 80 %, оскільки спектри можуть бути зміщені, і амплітуди можуть відрізнятися.

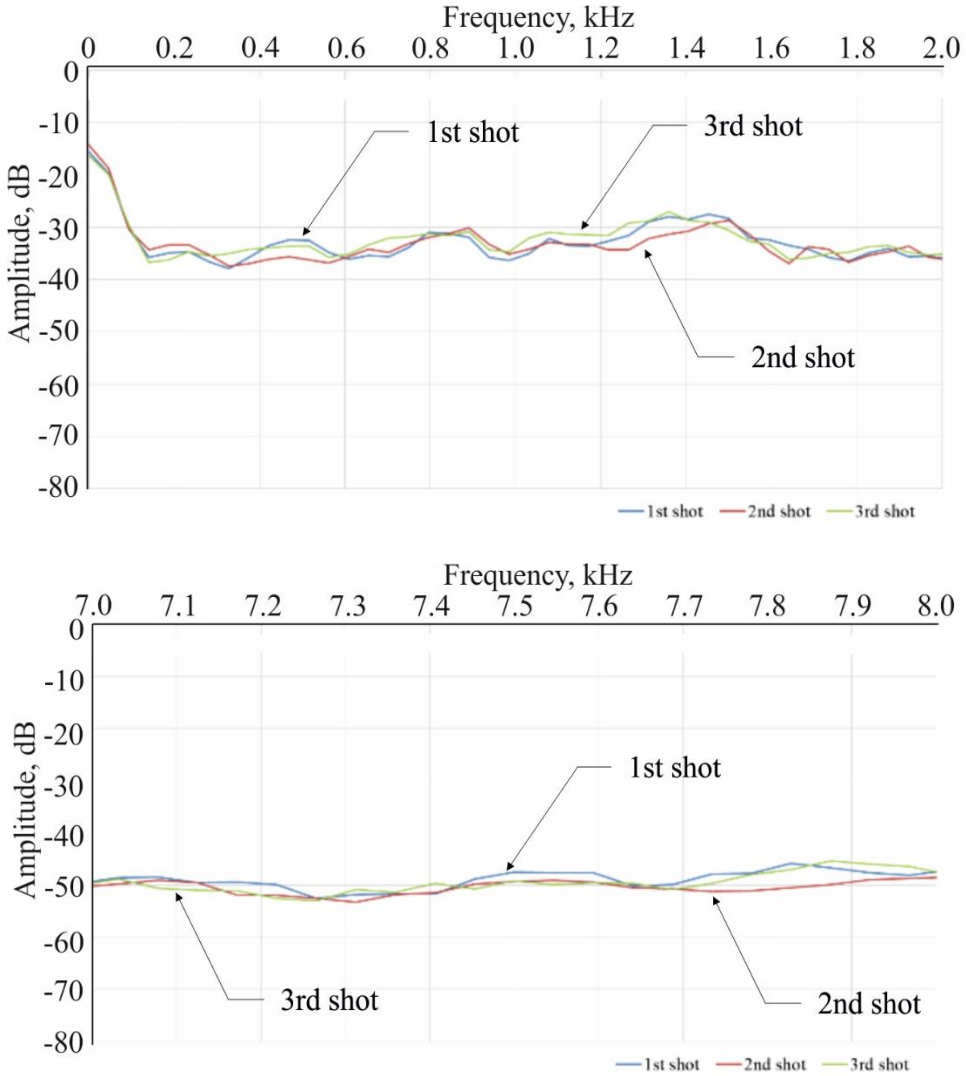


Рис. 11. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів травматичного пістолета «Форт-14Р»

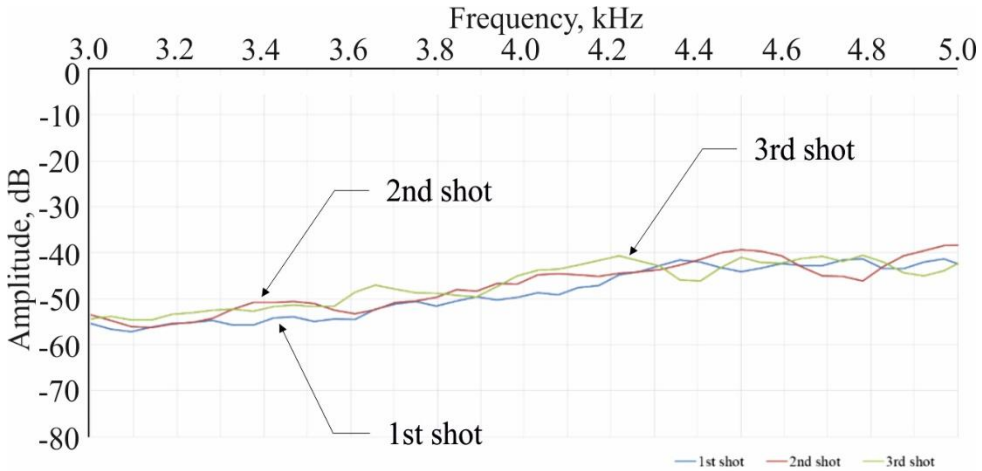


Рис. 12. Область ідентичних ділянок спектрів трьох пострілів автомата АК-74 калібру 5,45 мм

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

Для підвищення точності ідентифікації акустичного спектру в роботі застосовано метод віднімання спектрів. Це передбачає порівняння спектра, отриманого в поточному експерименті, з еталонним спектром, який був отриманий експериментально після проведення серії більше 50 пострілів. Так, для прикладу візьмемо три спектра пострілів зі стрілецької зброї (рис. 13), і порівняємо його з еталонним спектром, наведеним на рис. 14.

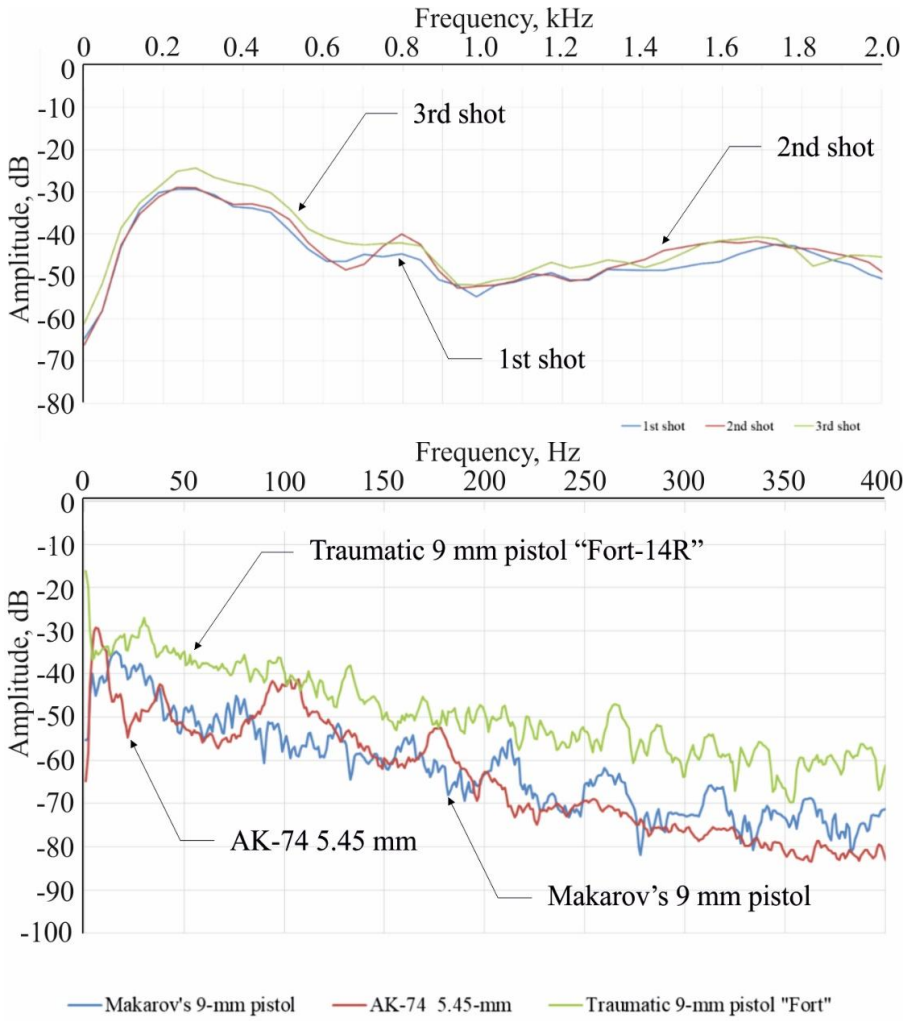


Рис. 13. Загальна амплітудно-частотні характеристики трьох пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» та автомата АК-74 калібру 5,45 мм

Достовірність результатів експерименту перевірялась методом критерію Ст’юдента, який призначений для оцінки статистичної значимості різниць між середніми значеннями вибірок, а також враховує обмежений розмір вибірки та забезпечує більш точні оцінки значущості відмінностей. В установлених межах 5 % відхилення результати дослідження все ще вважаються достовірними. З урахуванням цього, в роботі введено максимально допустиме інтервальне значення S_p. В межах цих інтервалів амплітудно-частотні характеристики пострілів вважаються достовірними для подальшого аналізу та інтерпретації (рис. 15).

Після застосування процедури віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів, результати наведені на рис. 16, можна зробити висновок, що лише один з представлених спектрів при цьому методі дає результат, що наближається до нуля. Це свідчить про те, що отриманий сигнал з високою ймовірністю 0,95 відповідає еталонному, а саме постріл з автомата АК-74 калібру 5,45 мм.

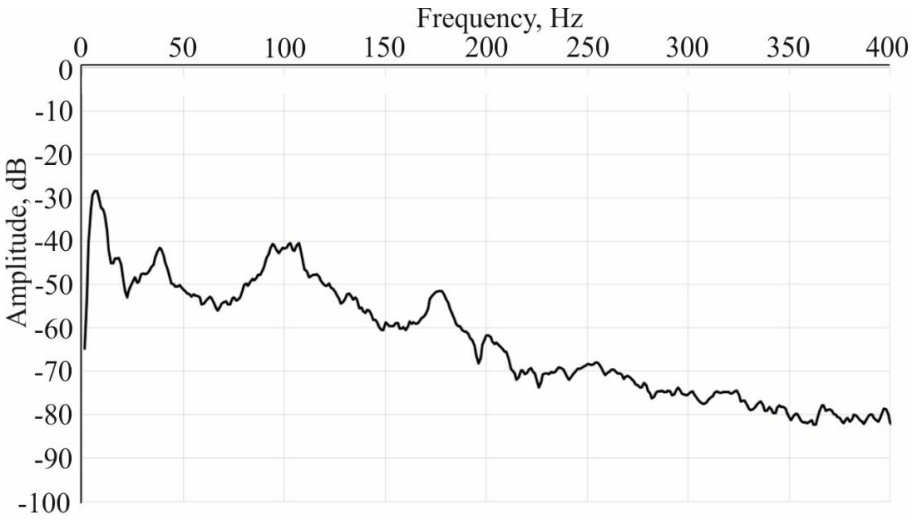


Рис. 14. Амплітудно-частотна характеристика еталонного спектра пострілу

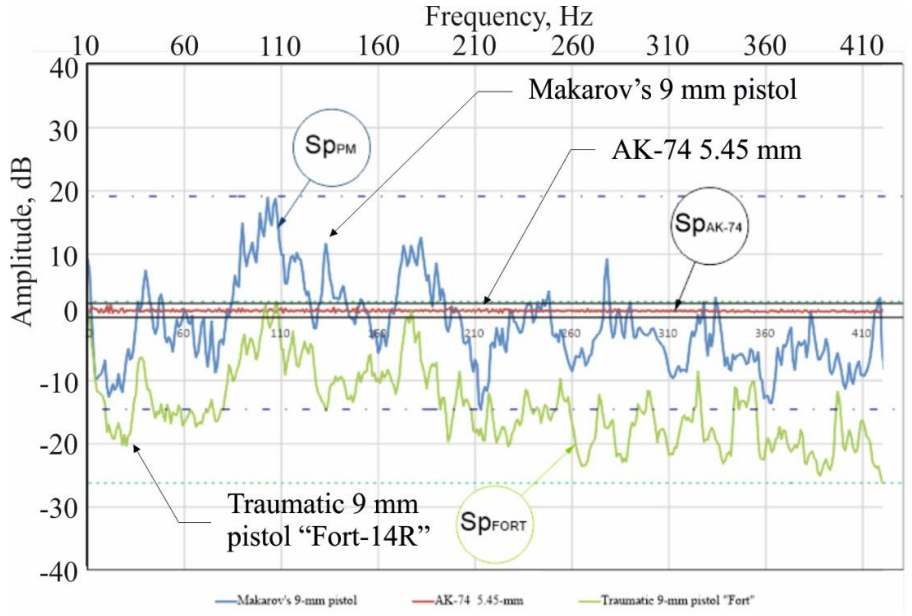


Рис. 15. Максимально допустиме значення S_p пострілів

Отриманні результати дають змогу розробити функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу.

5.3. Апаратна реалізація удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї

Функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу представлено на рис. 17.

Реальний аналоговий акустичний сигнал від пострілу вогнепальної зброї надходить до акустичного датчику у вигляді: $S(t) = A(t) + n(t)$, де $A(t)$ – прийнятий корисний акустичний сигнал від пострілу вогнепальної зброї, $n(t)$ – прийнятий шум. Цей сигнал проходить попередню обробку шляхом фільтрації шуму $n(t)$ за допомогою фільтру MF.

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

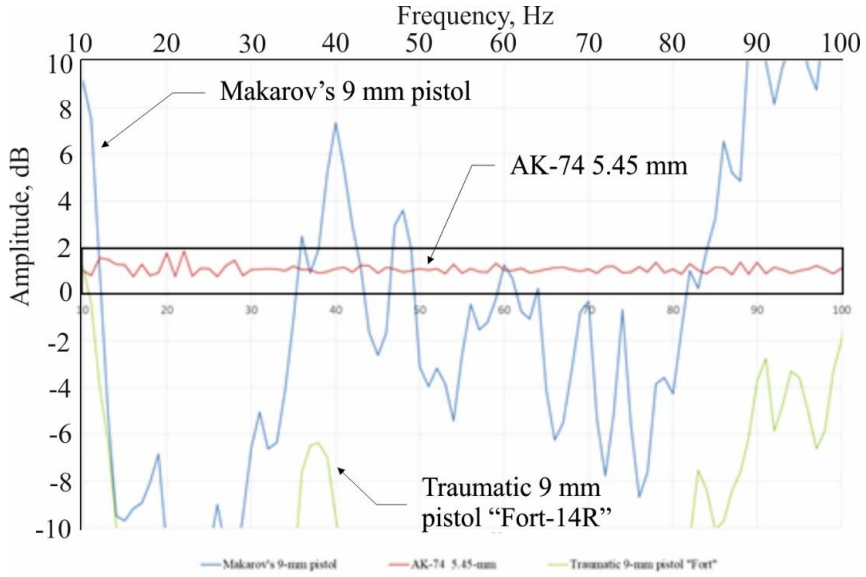


Рис. 16. Результати віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів

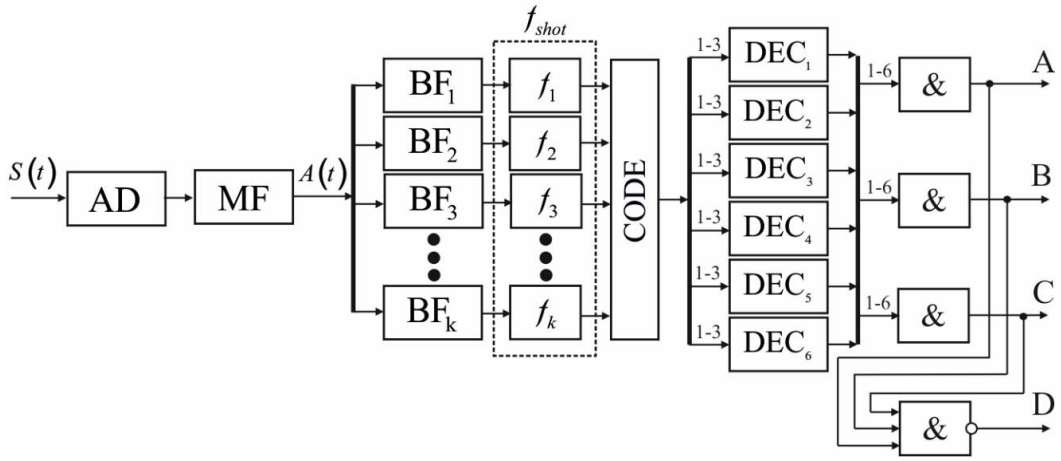


Рис. 17. Функціональна схема ідентифікації вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу: S(t) – вхідний акустичний сигнал, амплітуда якого змінюється у часі t; AD – акустичний датчик; MF – медіанний фільтр; BF_k – смугові фільтри, де k – кількість смугових фільтрів; f_{shot} – блок характеристичних частот пострілів; DEC – декодер; & – логічний елемент «Кон'юнкція»

Виділення характеристичних частот $(f_i$, де $i = 1,...,k)$ прийнятого корисного акустичного сигналу $A(t)$ здійснюється шляхом використання смугових фільтрів BF_k. Набір частот f_i формується з експериментальних даних для кожного типу вогнепальної зброї шляхом визначення спектральних гармонік з максимальними значеннями амплітуд (за умов максимальної енергії спектру). Результати аналізу експериментальних даних формують базу даних – блок характеристичних частот пострілів (f_{shot}), які є специфічними для конкретної зброї і дозволяють ідентифікувати її тип. Блок кодування (CODE) переводить сигнали на частотах f_i у двійковий код, з кількістю розрядів k. Результати кодування сигналів пострілів з пістолета Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолета «Форт-14Р» 9 мм та автомата АК-74 калібру 5.45 мм представлено у табл. 2.

Процес ідентифікації вогнепальної зброї базується на аналізі 18-розрядного коду за 6 групами по 3 розряди (рис. 17), шляхом застосування декодерів (DEC) та

логічних елементів «Кон'юнкція». В залежності від результатів аналізу, в каналах A, B та C з'являється відповідна комбінація сигналів, що відображає особливості зафіксованого пострілу. У разі відсутності в цих каналах сигналів на рівні логічної «1», в каналі D з'являється сигнал, який свідчить, що прийнятий акустичний сигнал не відповідає відомим зразкам вогнепальної зброї. Таким чином, підхід дозволяє розробити засіб автоматичного визначення типу вогнепальної зброї, функціонування якого спирається на кодуванні гармонік прийнятого акустичного сигналу на характеристичних частотах та порівняння отриманих результатів з базою даних двійкових кодів для різних видів зброї.

Табл. 2. Комбінації двійкового коду відповідно до характеристичних частот спектрів пострілів досліджуваних зразків вогнепальної зброї

Вид зброї	Канал	Резонансна частота смугового фільтру, кГц																	
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{14}	f_{15}	f_{16}	f_{17}	f_{18}
		0.6	0.8	1.3	1.5	1.7	2.3	2.8	3.0	3.6	4.0	4.5	6.0	7.7	8.4	8.9	11.6	12.3	13.6
		Двійковий код																	
ПМ 9 мм	A	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
АК-74 5.45 мм	B	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Форт-14Р	C	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0

Перспективою реалізації представленого у роботі підходу є розробка, на його основі, геоінформаційної системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї. Для цього передбачається виконання наступних процедур: 1) розміщення по території міста наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; 2) збір та систематизація інформації про стан акустичного простору міста; 3) ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу; 4) моделювання розвитку НС терористичного характеру на території міста; 5) розробку та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС терористичного характеру на території міста, а також мінімізації їх наслідків.

6. Обговорення результатів акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій

В роботі показано, що для забезпечення надійної акустичної ідентифікації джерела терористичних дій і точного визначення місця його виникнення в межах міста необхідно дотримання умов $R_D \le R_M$ рівняння (1), яке відображає закон збереження енергії та є рівнянням енергетичного балансу.

Експериментальним шляхом встановлено, що внаслідок зміни умов навколишнього середовища, невизначеності в методиках вимірювань, а також випадкових або систематичних помилок при обробці отриманих акустичних сигналів пострілів з однієї і тієї зброї спостерігаються зміщення (відхилення) акустичних спектральних характеристик, що відображено на рис. 9.

Підвищення ймовірності ідентифікації типу вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом при аналізі акустичного спектру пострілів досягається за рахунок врахування маси кулі, кількості пороху в патроні, швидкості кулі при вильоті із ствола, довжини та температури ствола тощо. Встановлено, що темпе-

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

ратура ствола є одним із найбільш значущих факторів, що впливає на відповідні характеристики спектрів звуку пострілів зі стрілецької зброї.

Для фільтрації сигналів використана порогова амплітуда, для визначення характеристичних частот, на яких амплітуда сигналу перевищує встановлене порогове значення. Підвищення точності ідентифікації акустичного спектру в роботі зумовлено застосуванням методу віднімання спектрів. Достовірність результатів експерименту перевірялась методом критерію Ст'юдента,

Після застосування процедури віднімання еталонного спектра від експериментально отриманих спектрів пострілів (рис. 16), можна зробити висновок про те, що лише один з представлених спектрів при цьому методі дає результат, що наближається до нуля. Це свідчить про те, що отриманий сигнал з високою ймовірністю 0,95 відповідає еталонному, а саме постріл з автомата АК-74 калібру 5,45 мм.

Отримані результати дозволили розробити функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу (рис. 17). Процес ідентифікації вогнепальної зброї базується на аналізі 18-розрядного коду за 6 групами по 3 розряди, шляхом застосування декодерів (DEC) та логічних елементів «Кон'юнкція». В залежності від результатів аналізу відбувається ідентифікація прийнятого акустичного сигналу на відповідність відомим зразкам вогнепальної зброї, що дозволяє розробити засіб автоматичного визначення її типу.

Подальшим розвитком дослідження стане реалізація з використанням представленого у роботі підходу геоінформаційної системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різних типів вогнепальної зброї.

7. Висновки

1. Удосконалено метод ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за параметрами та характеристиками акустичних спектрів пострілів, який являє собою: визначення характеристичних частот за умов перевищення порогового рівня амплітуд гармонік прийнятого сигналу; визначення енергії такого спектра; віднімання енергії еталонного спектра від енергій експериментально отриманих спектрів пострілів. Застосування удосконаленого методу для дослідження характеристик акустичних спектрів пострілів з пістолету Макарова калібру 9 мм, травматичного пістолету «Форт-14Р» та автомату АК-74 калібру 5,45 мм дозволило з ймовірністю 0,95 ідентифікувати тип вогнепальної зброї за прийнятим акустичним сигналом.

2. Розроблено функціональну схему апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу, яка включає: медіанний фільтр; смугові фільтри; блок характеристичних частот пострілів; блок кодування; блок декодерів; блок логічних елементів «Кон'юнкція». Процес ідентифікації вогнепальної зброї базується на аналізі 18-розрядного коду за 6 групами по 3 розряди. В залежності від результатів аналізу, на виході засобу з'являється відповідна комбінація сигналів, що відображає особливості зафіксованого пострілу або свідчить, що прийнятий акустичний сигнал не відповідає відомим зразкам вогнепальної зброї.

3. Встановлені особливості розробки та функціонування, на основі схеми апаратної реалізації удосконаленого методу ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу, геоінформаційної системи акустичного моніторингу НС терористичного характеру та автоматизованої ідентифікації у міській зоні фактів застосування різ-

них типів вогнепальної зброї. Для цього передбачається виконання наступних процедур: 1) розміщення по території міста наземних стаціонарних засобів автоматизованого контролю акустичного простору; 2) збір та систематизація інформації про стан акустичного простору міста; 3) ідентифікації фактів застосування різних типів вогнепальної зброї за спектральними властивостями прийнятого акустичного сигналу; 4) моделювання розвитку НС терористичного характеру на території міста; 5) розробку та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС терористичного характеру на території міста, а також мінімізації їх наслідків.

Література

1. Тютюник В. В., Тютюник О. О., Усачов Д. В. Особливості створення системи акустичного моніторингу джерел надзвичайних ситуацій у контексті розвитку концепції «Smart city». Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. Київ: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту. 2023. № 2. С. 58–76. doi: 10.33269/nvcz.2023.2.58-76

2. Рубан І. В., Тютюник В. В., Тютюник О. О. Розвиток науково-технічних основ оперативного геоінформаційного акустичного моніторингу джерел терористичних небезпек. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: Національний університет оборони України. 2020. Вип. 3(39). С. 67–80. doi: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-67-80

3. Стрілянина в супермаркеті Walmart у США: загинули до 10 людей. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/news-63726537

4. У центрі Львова 24-річний чоловік влаштував стрілянину в готелі. URL: http://zaxid.net/u_tsentri_lvova_24_richniy_cholovik_vlashtuvav_strilyaninu_v_goteli_n1553963

5. Стрілянина в Римі: троє загиблих, четверо поранених. URL: https://tsn.ua/svit/strilyanina-v-rimi-troye-zagiblih-chetvero-poranenih-2220880.html

6. 39-річного чоловіка затримали за стрілянину біля лісу на Закарпатті. URL: https://zaxid.net/39_richnogo_cholovika_zatrimali_za_strilyaninu_bilya_lisu_na_zakarpatti_n1555003

7. Стрілянина в центрі Парижа: троє людей вбиті, кілька поранених. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/news-64078090

8. В американській школі сталася стрілянина: є загиблі. URL: https://tsn.ua/svit/v-amerikanskiy-shkoli-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-2249953.html

9. Озброєний автоматом чоловік увірвався до посольства Азербайджану в Ірані і влаштував стрілянину. URL: https://tsn.ua/svit/ozbroyeniy-avtomatom-cholovik-uvirvavsya-u-posolstvo-azerbaydzhanu-v-irani-i-vlashtuvav-strilyaninu-video-2252779.html

10. У США сталася стрілянина: повідомляють про 10 загиблих. URL: https://tsn.ua/svit/u-ssha-stalasya-strilyanina-povidomlyayut-pro-10-zagiblih-foto-2248942.html

11. У США сталася чергова масова стрілянина: є жертви. URL: https://tsn.ua/svit/v-ssha-stalasya-chergova-masova-strilyanina-ye-zhertvi-2254741.html

12. В університеті штату Мічиган сталася стрілянина: є загиблі та поранені. URL: https://tsn.ua/svit/v-universiteti-shtatu-michigan-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-ta-poraneni-2265409.html

13. Друга масова стрілянина у Каліфорнії за кілька днів – семеро загиблих. URL: https://www.bbc.com/ukrainian/news-64383486

14. Спочатку вбив батька, а потім ще 15 людей: журналіст про деталі наймасовішої стрілянини в історії Чехії. URL: https://tsn.ua/exclusive/spochatku-vbiv-batka-a-potim-sche-15-lyudey-zhurnalist-pro-detali-naymasovishoyi-strilyanini-v-istoriyi-chehiyi-2477170.html

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

15. У Стамбулі сталася стрілянина в італійській церкві – одна людина загинула. URL: https://pmg.weukraine.tv/novyny/u-stambuli-stalasja-striljanina-v-italijskij-tserkvi-odna-ljudina-zahinula/

16. У Грузії внаслідок стрілянини на ринку загинуло четверо людей. URL: https://zaxid.net/u_gruziyi_vnaslidok_strilyanini_na_rinku_zaginulo_chetvero_lyudey_n1579717

17. У Детройті внаслідок стрілянини у парку поранення отримали 9 осіб. Серед них мама і два сини. URL: https://lb.ua/world/2024/06/16/619152_detroyti_vnaslidok_strilyanini.html

18. У школі в США сталася стрілянина: загинули щонайменше четверо людей, підозрюють 14-річного підлітка. URL: https://nv.ua/ukr/world/countries/strilyanina-u-ssha-pidlitok-vidkriv-vogon-po-lyudyah-chotiri-lyudini-zaginuli-50448394.html

19. На Тернопільщині чоловік розстріляв людей біля сільської школи. URL: https://lenta.te.ua/society/2024/08/15/203395.html

20. Рішення Ради національної безпеки і оборони України від 4 червня 2021 року «Щодо удосконалення мережі ситуаційних центрів та цифрової трансформації сфери національної безпеки і оборони», Введено в дію Указом Президента України від 18 червня 2021 року № 260/2021. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text

21. Татарнікова Т.О. Експертні дослідження матеріалів та засобів цифрового звукозапису: дис. на здобуття наук. ступеня канд. юрид. наук: спец. 12.00.09 «Кримінальний процес та криміналістика; судова експертиза; оперативно-розшукова діяльність». Київ: Національна академія внутрішніх справ, 2016. 238 с. URL: https://elar.naiau.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/e0d8a667-8de2-4465-a190-ce312071ab6f/content

22. Sniper Location & Gunshot Detection Systems. URL: https://defense-update.com/20081123_sniper_detection.html#google_vignette

23. Dennis Mares. Reducing Gunfire through Acoustic Technology. Problem-oriented guides for police. Response guide series № 14. Gunshot Detection. URL: URL: HTTPS://WWW.RESEARCHGATE.NET/PUBLICATION/365278760_PROBLEM-ORIENTED_GUIDES_FOR_POLICE_RESPONSE_GUIDE_SERIES_NO_14_GUNSHOT_DETECTION_Reducing_Gunfire_through_Acoustic_Technology

24. Rheinmetall brings Acoustic Shooter Locating System (ASLS) to market. URL: https://www.defenceweb.co.za/land/land-land/rheinmetall-brings-acoustic-shooter-locating-system-asls-to-market/

25. Acoustic shooter locating system. URL: https://www.rheinmetall.com/en/products/c4i/reconnaissance-and-sensor-systems/asls-acoustic-shooter-locating-system#anchor-optional

26. Boomerang Shooter Detection Technology. URL: https://milcom-security.com/wp-content/uploads/BoomerangGeneral-102010-5.pdf

27. Projectile Detection and Cueing (PDCue). URL: https://defense-update.com/20070511_pdcue.html#google_vignette

28. PEARL – Gunshot detection sensor for personal or group weapons. URL: https://issuu.com/robertbreedveld/docs/bss_holland_gunshot_detectie_pearl

29. Surveillance and Threat Detection Systems. URL: https://www.dbkes.com.tr/brosur/pilarw.pdf

30. Офіційний сайт компанії Microflown Avisa. URL: https://www.microflown-avisa.com/technology

31. Sniper Egg. Detecting the threat. Protecting our forces. URL:

https://defenceforumindia.com/attachments/sniper-egg-pdf.8391/

32. PinPoint™ – Dismount shot Detection Systems. URL: https://www.yumpu.com/en/document/view/11476334/pinpointtm-dismount-shot-detection-systems

33. Локатор джерела пострілу. URL: https://ames.kpi.ua/lokator-dzherela-postrilu/

34. Тютюник В. В., Лєвтєров О. А., Тютюник О. О., Усачов Д. В. Розвиток науково-технічних основ створення геоінформаційної системи акустичного моніторингу масштабних пожеж із рідкими органічними речовинами на території міста. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: Національний університет оборони України. 2024. Вип. 1(49). С. 111–127. doi: 10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127

V. Tiutiunyk*[1]*, *DSc, Professor, Head of Department*
O. Lievtierov*[1]*, *DSc, Professor, Associate Professor of the Department*
O. Tiutiunyk*[2]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
D. Usachov*[1]*, *Adjunct*
[1] *National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine*
[2]*Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine*

ACOUSTIC MONITORING OF SOURCES OF EMERGENCY SITUATIONS RELATED TO THE DEVICE OF FIREARMS

The method of identifying the facts of the use of various types of firearms has been improved based on the use of the average characteristic of the acoustic spectrum of a shot, by determining the characteristic frequencies with maximum amplitude values, which consists in determining the characteristic frequencies under conditions of exceeding the threshold level of amplitudes of the harmonics of the received signal, determining the energy of such a spectrum, and subtracting the energy of the reference spectrum from the energies of the experimentally obtained spectra of shots. The use of the improved method for studying the characteristics of the acoustic spectra of shots from a Makarov pistol of 9 mm caliber, a traumatic pistol "Fort-14R" and an AK-74 assault rifle of 5.45 mm caliber made it possible to identify the type of firearms by the received acoustic signal with a probability of 0.95. Based on the research results, a functional diagram of the hardware implementation of the improved method for identifying the facts of using various types of firearms by the spectral properties of the received acoustic signal has been developed. The circuit implements a median filter, bandpass filters, a block of characteristic frequencies of shots, an encoding block, a decoder block and a block of logical elements "Conjunction". The identification process consists of analyzing an 18-bit code in 6 groups of 3 digits, at the output of the processing results there is a corresponding combination of signals that determines the belonging to a certain type of weapon and / or its presence in the database of known samples. Based on the hardware implementation circuit of the improved method for identifying the facts of the use of various types of firearms by the spectral properties of the received acoustic signal, the features of the development and operation of a geographic information system for acoustic monitoring of terrorist emergencies and automated identification of facts of use in an urban area are established.

Keywords: monitoring, identification, acoustic signal, signal filtration, spectral analysis, amplitude-frequency characteristic

References

1. Tiutiunyk, V., Tiutiunyk, O., Usachov, D. (2023). Features of Creating a System of Acoustic Monitoring of Emergency Sources in the Context of the Development of the Smart City Concept. Naukovyy visnyk: Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka. Kyyiv: Instytut derzhavnoho upravlinnya ta naukovykh doslidzhen' z tsyvil'noho zakhystu, 2, 58–76. doi: 10.33269/nvcz.2023.2.58-76

2. Ruban, I., Tiutiunyk, V., Tiutiunyk, O. (2020). Development of Scientific and Technical Basis of Operational Geoinformation Acoustic Monitoring of Sources of Terrorist Threats. Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony. Kyyiv: Natsional'nyy universytet oborony Ukrayiny, 3(39), 67–80. doi: 10.33099/2311-7249/2020-39-3-67-80

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов

3. Strilyanyna v supermarketi Walmart u SShA: zahynuly do 10 lyudey. Available at: https://www.bbc.com/ukrainian/news-63726537

4. U tsentri L'vova 24-richnyy cholovik vlashtuvav strilyanynu v hoteli. Available at: http://zaxid.net/u_tsentri_lvova_24_richniy_cholovik_vlashtuvav_strilyaninu_v_goteli_n1553963

5. Strilyanyna v Rymi: troye zahyblykh, chetvero poranenykh. Available at: https://tsn.ua/svit/strilyanina-v-rimi-troye-zagiblih-chetvero-poranenih-2220880.html

6. 39-richnoho cholovika zatrymaly za strilyanynu bilya lisu na Zakarpatti. Available at: https://zaxid.net/39_richnogo_cholovika_zatrimali_za_strilyaninu_bilya_lisu_na_zakarpatti_n1555003

7. Strilyanyna v tsentri Paryzha: troye lyudey vbyti, kil'ka poranenykh. Available at: https://www.bbc.com/ukrainian/news-64078090

8. V amerykans'kiy shkoli stalasya strilyanyna: ye zahybli. Available at: https://tsn.ua/svit/v-amerikanskiy-shkoli-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-2249953.html

9. Ozbroyenyy avtomatom cholovik uvirvavsya do posol'stva Azerbaydzhanu v Irani i vlashtuvav strilyanynu. Available at: https://tsn.ua/svit/ozbroyeniy-avtomatom-cholovik-uvirvavsya-u-posolstvo-azerbaydzhanu-v-irani-i-vlashtuvav-strilyaninu-video-2252779.html

10. U SShA stalasya strilyanyna: povidomlyayut' pro 10 zahyblykh. Available at: https://tsn.ua/svit/u-ssha-stalasya-strilyanina-povidomlyayut-pro-10-zagiblih-foto-2248942.html

11. U SShA stalasya cherhova masova strilyanyna: ye zhertvy. Available at: https://tsn.ua/svit/v-ssha-stalasya-chergova-masova-strilyanina-ye-zhertvi-2254741.html

12. V universyteti shtatu Michyhan stalasya strilyanyna: ye zahybli ta poraneni. Available at: https://tsn.ua/svit/v-universiteti-shtatu-michigan-stalasya-strilyanina-ye-zagibli-ta-poraneni-2265409.html

13. Druha masova strilyanyna u Kaliforniyi za kil'ka dniv – semero zahyblykh. Available at: https://www.bbc.com/ukrainian/news-64383486

14. Spochatku vbyv bat'ka, a potim shche 15 lyudey: zhurnalist pro detali naymasovishoyi strilyanyny v istoriyi Chekhiyi. Available at: https://tsn.ua/exclusive/spochatku-vbiv-batka-a-potim-sche-15-lyudey-zhurnalist-pro-detali-naymasovishoyi-strilyanini-v-istoriyi-chehiyi-2477170.html

15. U Stambuli stalasya strilyanyna v italiys'kiy tserkvi – odna lyudyna zahynula. Available at: https://pmg.weukraine.tv/novyny/u-stambuli-stalasja-striljanina-v-italijskij-tserkvi-odna-ljudina-zahinula/

16. U Hruziyi vnaslidok strilyanyny na rynku zahynulo chetvero lyudey. Available at: https://zaxid.net/u_gruziyi_vnaslidok_strilyanini_na_rinku_zaginulo_chetvero_lyudey_n1579717

17. U Detroyti vnaslidok strilyanyny u parku poranennya otrymaly 9 osib. Sered nykh mama i dva syny. Available at: https://lb.ua/world/2024/06/16/619152_detroyti_vnaslidok_strilyanini.html

18. U shkoli v SShA stalasya strilyanyna: zahynuly shchonaymenshe chetvero lyudey, pidozryuyut' 14-richnoho pidlitka. Available at: https://nv.ua/ukr/world/countries/strilyanina-u-ssha-pidlitok-vidkriv-vogon-po-lyudyah-chotiri-lyudini-zaginuli-50448394.html

19. Na Ternopil'shchyni cholovik rozstrilyav lyudey bilya sil's'koyi shkoly. Available at: https://lenta.te.ua/society/2024/08/15/203395.html

20. Rishennya Rady natsional'noyi bezpeky i oborony Ukrayiny vid 4 chervnya

2021 roku «Shchodo udoskonalennya merezhi sytuatsiynykh tsentriv ta tsyfrovoyi transformatsiyi sfery natsional'noyi bezpeky i oborony», Vvedeno v diyu Ukazom Prezydenta Ukrayiny vid 18 chervnya 2021 roku #260/2021. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0039525-21#Text

21. Tatarnikova, T. O. (2016). Ekspertni doslidzhennya materialiv ta zasobiv tsyfrovoho zvukozapysu: dys. na zdobuttya nauk. stupenya kand. yuryd. nauk: spets. 12.00.09 «Kryminal'nyy protses ta kryminalistyka; sudova ekspertyza; operatyvno-rozshukova diyal'nist'». Kyyiv: Natsional'na akademiya vnutrishnikh sprav, 238. Available at: https://elar.naiau.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/e0d8a667-8de2-4465-a190-ce312071ab6f/content

22. Sniper Location & Gunshot Detection Systems. Available at: https://defense-update.com/20081123_sniper_detection.html#google_vignette

23. Dennis Mares. Reducing Gunfire through Acoustic Technology. Problem-oriented guides for police. response guide series NO. 14. GUNSHOT DETECTION. Available at: https://www.researchgate.net/publication/365278760_PROBLEM-ORIENTED_GUIDES_FOR_POLICE_RESPONSE_GUIDE_SERIES_NO_14_GUNSHOT_DETECTION_Reducing_Gunfire_through_Acoustic_Technology

24. Rheinmetall brings Acoustic Shooter Locating System (ASLS) to market. Available at: https://www.defenceweb.co.za/land/land-land/rheinmetall-brings-acoustic-shooter-locating-system-asls-to-market/

25. Acoustic shooter locating system. Available at: https://www.rheinmetall.com/en/products/c4i/reconnaissance-and-sensor-systems/asls-acoustic-shooter-locating-system#anchor-optional

26. Boomerang Shooter Detection Technology. Available at: https://milcom-security.com/wp-content/uploads/BoomerangGeneral-102010-5.pdf

27. Projectile Detection and Cueing (PDCue). Available at: https://defense-update.com/20070511_pdcue.html#google_vignette

28. PEARL – Gunshot detection sensor for personal or group weapons. Available at: https://issuu.com/robertbreedveld/docs/bss_holland_gunshot_detectie_pearl

29. Surveillance and Threat Detection Systems. Available at: https://www.dbkes.com.tr/brosur/pilarw.pdf

30. Ofitsiynyy sayt kompaniyi Microflown Avisa. Available at: https://www.microflown-avisa.com/technology

31. Sniper Egg. Detecting the threat. Protecting our forces. Available at: https://defenceforumindia.com/attachments/sniper-egg-pdf.8391/

32. PinPoint™ – Dismount shot Detection Systems. Available at: https://www.yumpu.com/en/document/view/11476334/pinpointtm-dismount-shot-detection-systems

33. Lokator dzherela postrilu. Available at: https://ames.kpi.ua/lokator-dzherela-postrilu/

34. Tiutiunyk, V., Lievtierov, O., Tiutiunyk, O., Usachov, D. (2024). The Peculiarities of Acoustic Monitoring of Large Fires with Rare Organic Substances in Urban Areas. Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony. Kyyiv: Natsional'nyy universytet oborony Ukrayiny, 1(49), 111–127. doi: 10.33099/2311-7249/2024-49-1-111-127

Надійшла до редколегії: 12.10.2024
Прийнята до друку: 16.11.2024

© В. В. Тютюник, О. А. Лєвтєров, О. О. Тютюник, Д. В. Усачов