ISSN 2524-0226

ПРОБЛЕМИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

1(39)2024

Content / Зміст

Tregubov D., Trefilova L., Minska N., Hapon Yu., Sokolov D. Nonlinearities correlation of n-alkanes and n-alcohols physicochemical properties 4
Белюченко Д. Ю., Стрілець В. М., Луценко Т. О., Корчагін П. О., Маловик І. В., Ребров О. В. Обґрунтування нормативів для оцінювання оперативних розгортань в засобах бронезахисту 25
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» 40
Басманов О. Є., Максименко М. В., Олійник В. В. Оптимальний вибір сил та засобів для локалізації пожежі в резервуарній групі 55
Неклонський І. М., Смирнов О. М. Ризик-орієнтований підхід щодо впровадження технології утилізації протитанкових реактивних снарядів 66
Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини 81
Дурєєв В. О., Христич В. В., Бондаренко С. М., Маляров М. В., Прокофьєв М. І. Моделювання роботи магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача 96
Остапов К. М., Сенчихін Ю. М., Аветісян В. Г., Кириченко І. К., Тарасенко О. П. Удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючого складу 109
Григоренко О. М., Саєнко Н. В., Золкіна Є. С., Липовий В. О. Оптимізація методу оцінки ефективності реактивних вогнезахисних покриттів 124
Шахов С. М., Виноградов С. А., Мельниченко А. С., Савельєв Д. І., Семків В. О. Підвищення рівня безпеки людей під час повітряної тривоги 135
Зімін С. І., Афанасенко К. А. Коефіцієнт тепловіддачі факельної установки за умов вільної конвекції 147
Kalchenko Y., Afanasenko K., Vavreniuk S., Pisklova D. Assessment of excess pressure during accidents at oil refineries 157
Коваленко Р. І., Назаренко С. Ю., Михлюк Е. І., Остапов К. М. Закономірності виникнення пожеж в містах під час воєнного стану 167
Коханенко В. Б., Кривошей Б. І. Аналіз характерних дефектів шин пожежних автоцистерн та методика їх визначення 179
Куценко Л. М., Руденко С. Ю., Калиновський А. Я., Поліванов О. Г., Сухарькова О. І. Геометричне моделювання пневматичних фасонних поверхонь обертання, зміцнених намоткою нитки 192
Поспєлов Б. Б., Рибка Є. О., Мелещенко Р. Г., Безугла Ю. С., Ященко О. А., Бородич П. Ю. Особливості середньої бікогерентності динаміки параметрів газового середовища при появі загорянь 218
Фещенко А. Б., Закора О. В., Собина В. О. Оперативна готовність типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі 237
Роянов О. М., Катунін А. М., Кулаков О. В., Богатов О. І. Оцінка впливу вологості повітря на вибухопожежонебезпеку приміщень з горючим пилом 252
Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A., Goncharenko Y., Melezhyk R. Silicophosphate fireproof coatings for building materials 261
Скрипинець А. В., Саєнко Н. В., Григоренко О. М., Афанасенко К. А., Макаренко О. В. Важкогорюча віброзахисна мастика для залізничного рухомого складу 272

УДК 699.84+691.17+629.11+623.4+621.39+621.03+614.8+544.16+539.19+519.8+519.6+514.18+313.86

Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2024. № 1(39). 284 с.

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

Андронов В. А., д.т.н., професор, Заслужений діяч науки і техніки, НУЦЗ України, Харків (Україна) – головний редактор; **Рибка Є. О.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна) – заступник головного редактора; **Абрамов Ю. О.,** д.т.н., професор, Заслужений винахідник України, НУЦЗ 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, Харків (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, Харків (Україна); **Зайцев Р. В.,** д.т.н., доцент, НТУ «ХПІ», Харків (Україна); **Кірєєв О. О.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Колосков В. Ю.,** к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Кондратенко О. М.,** д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Кустов М. В.,** д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Лобойченко В. М.,** д.т.н., професор, Луцький НТУ, Луцьк (Україна); **Магас Н. М.,** к.т.н., доцент, Словацький технологічний університет, Братислава (Словаччина); **Мелещенко Р. Г.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Мінська Н. В.,** д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Отрош Ю. А.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Пономаренко Р. В.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Поспєлов Б. Б.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Саєнко С. Ю.,** д.т.н., старший науковий співробітник, ННЦ ХФТІ, Харків (Україна); **Семків О. М.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Семко В. О.,** д.т.н., професор, Познанський технологічний університет, Познань (Польща); **Стрілець В. М.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Трефілова Л. М.,** д.ф.-м.н., старший науковий співробітник, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Тютюник В. В.,** д.т.н., професор, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Христич О. В.,** к.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (Україна); **Шаршанов А. Я.,** д.т.н., доцент, НУЦЗ України, Харків (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).

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. Чернишевська, 94,
Харків, 61023

Контактна інформація
Tel.: +38 (057) 707-34-90
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
№ 10 від 24.04.2024

Підписано до друку
24.04.2024

Формат 60x84/16
Папір 80 г/м^2
Ум. друк. арк. 15,4
Тираж 100 прим.
Вид. № 33/24

© Національний університет цивільного захисту України, 2024

UDC 699.84+691.17+629.11+623.4+621.39+621.03+614.8+544.16+539.19+519.8+519.6+514.18+313.86

Problems of Emergency Situations. Kharkiv: NUCD Ukraine, 2024. № 1(39). 284 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

Andronov Volodymyr, DSc, Professor, Honored Worker of Science and Technology, NUCDU, Kharkiv (Ukraine) – Editor in Chief; **Rybka Evgeniy,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine) – Deputy Editor in Chief; **Abramov Yurii,** DSc, Professor, Honored inventor of Ukraine, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Buskin Olga,** PhD, Newcastle University, Newcastle upon Tyne (Great Britain); **Basmanov Oleksii,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (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, Kharkiv (Ukraine); **Zaitsev Roman,** DSc, Associate Professor, NTU «KhPI», Kharkiv (Ukraine); **Kireev Oleksandr,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Koloskov Volodymyr,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Kondratenko Oleksandr,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Kustov Maksym,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Loboychenko Valentyna,** DSc, Professor, LNTU, Lutsk (Ukraine); **Mahas Nataliia,** PhD, Associate Professor, Slovak University of Technology, Bratislava, (Slovakia); **Meleshchenko Ruslan,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Minska Natalia,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Otrosh Yurii,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Ponomarenko Roman,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Pospelov Borys,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Sayenko Serhii,** DSc, Senior Researcher, NSC KIPT, Kharkiv (Ukraine); **Semkiv Oleh,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Semko Volodymyr,** DSc, Professor, Poznan University of Technology, Poznan (Poland); **Strelec Viktor,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Trefilova Larysa,** DSc, Senior Researcher, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Tiutiunyk Vadym,** DSc, Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Khrystych Olena,** PhD, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (Ukraine); **Sharshanov Andriy,** DSc, Associate Professor, NUCDU, Kharkiv (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); **Mugavero Roberto,** PhD, University of the Republic of San Marino, San Marino (Italy); **Mulandane Fernando Chanisso,** PhD, Eduardo Mondlane University, Maputo (Mozambique).

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
Chernyshevska Str., 94,
Kharkiv, Ukraine, 61023

Contact information
Tel.: +38 (057) 707-34-90
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
№ 10 dated 24.04.2024

Signed for print
24.04.2024

Format 60x84/16
Paper 80 g/m^2
Condit. print. sheet. 15,4
Circulation 100 cop.
Publ. № 33/24

© National University of Civil Defence of Ukraine, 2024

УДК 614.833:544.169:539.199

D. Tregubov, *PhD, Associate Professor, Doctoral Student (ORCID 0000-0003-1821-822X)*
L. Trefilova, *DSc, Senior Researcher, Professor of the Department (ORCID 0000-0001-9061-4206)*
N. Minska, *DSc, Associate Professor, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0001-8438-0618)*
Yu. Hapon, *PhD, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0002-3304-5657)*
D. Sokolov, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-7772-6577)*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

NONLINEARITIES CORRELATION OF N-ALKANES AND N-ALCOHOLS PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES

Correspondences between the changes nonlinearity in substance physico-chemical parameters and the influence mechanisms on them by the substance supramolecular structure in the calculated dependencies form for n-alkanes and n-alcohols was established. Similarity, change features and correlation between such parameters as melting point, boiling point, flash point, self-ignition, density, solubility in water, viscosity, vaporization heat, surface tension were investigated. The paper obtained 14 calculated dependencies that calculate these parameters on the established similarity basis between them and the lengths of the molecule or cluster with sufficient correlation coefficients. For viscosity, vaporization heat and surface tension, change general dependences are established, but without taking into account oscillatory deviations. Calculated dependences between substance characteristic temperatures were obtained: melting temperatures of alkanes and alcohols, boiling and flash temperatures in homologous series, autoignition and melting temperatures (flash, boiling). This correlation is explained by the fact that supramolecular structures are formed according to a similar principle in matter different states and during the combustion initiation. Such structures modeling for the solid, liquid state, and solubility in water was carried out, taking into account different coordination numbers, globulation, and changes in the clustering place according to the molecule length. On the such modeling basis and the "melting ease" indicator, dependencies have been developed for calculation with the dependencies nonlinearities reflection of alkanes and alcohols density and melting temperature. For the boiling and flash point, vaporization heat of alcohols, the deviation from linearity is taken into account by the cluster length reduction parameter. It is shown that the considered dependencies modulation by the cluster length allows to describe their anomalies and increases the calculation convergence.

Keywords: n-alcohols, n-alkanes, physicochemical properties, cluster, model, nonlinearity, calculation convergence

1. Introduction

Ensuring the fire safety in production and in the civil sphere is realized through forecasting and control of substances certain indicators. It can be said that this knowledge branch is material science about critical states. The combustible substances and building materials properties are formed on the basis of physicochemical properties combinations. Accordingly, there is a correlation relationship between them. Usually, in practical calculations of fire hazard parameters, pairwise correlations between them and certain "fundamental" properties are used. But, as the previous analysis showed, none of the physicochemical and fire hazard properties behaves identically to another parameter [1]. This leads to inadequate prediction of some substances fire hazard in the hydrocarbons homologous series in a "random" way. There are calculation equations based on clear physico-chemical models that claim to be universal and allow calculations for various homologous classes; but these equations, in addition to the calculation complexity and the certain data lack for their wide application, have a drawback in the form of the model incompleteness, which incorrectly takes into account the certain factors ratio or omits a certain factor. Nevertheless, the existing improvement and the new universal methods development with high forecasting accuracy is of great interest.

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

The problem arises of a more detailed study of correlations between substance various properties with the possibility of predicting fire hazard parameters of hydrocarbons several homologous classes at the same time. A significant drawback of the existing calculation methods in this direction is the ignoring and lack of mechanisms for taking into account contributions of intermolecular interaction and the supramolecular structures presence on nonlinearity in changes of homologues certain properties. Nevertheless, recent studies indicate the such structures presence and their corresponding influence on substance certain parameters, in particular, the cluster equivalent length is adopted as the basic modulating parameter [2].

Thus, at present, the problem of taking into account the substance supramolecular structure, which can exist in the form of stable clusters or temporary structures, in the formation processes of fire hazard parameters and their forecasting methods remains unsolved. The determined state of the substance physico-chemical properties forecasting issue indicates the relevance and perspective of conducting additional research on the new methods or calculation basis creation.

2. Analysis of literature data and problem statement

Solving the systematic errors presence problem in calculation methods for predicting fire hazard parameters involves conducting a comparative analysis of substance various physicochemical properties within one homologous series and in relation to hydrocarbons another class. It is possible to single out the substences and environment properties levels, which consistently determine the formation of the properties next level, starting with the atomic one. For example, the flash point (t_{fp}) value will be affected by the following chain of factors: atomic composition – molar mass – type and number of chemical bonds – molecular structure – content of clusters and individual molecules – substance formation heat – vaporization heat – initial conditions – saturated vapor pressure – vapor concentration – ignition source parameters – lower flammable limit (LFL) – air mixture thermophysical parameters – flash point [1]. Such a sequence means that any of the previous parameters can be used to predict t_{fp} individually or in combination with another parameter. Then, for a homologous series, one of these levels can become modulating to describe the change in the actual dependence of another parameter, and therefore will reflect oscillatory, stepped, pulsating nonlinear features within the calculation method limits.

Many models are known for the mathematical description of the hydrocarbons vaporization heat (H_{vap}) [1, 3, 4], which are narrowly specialized for n-alkanes or n-alcohols, and also do not describe some anomalies. For example, for n-alkanes with n_C=5–40, a formula was developed: H_{vap}=5684,27+5295,41n_C–17,2732T_{bp}, J/mol [3], that indirectly and does not fully take into account the nonlinearities of H_{vap}, does not work for first representatives of homologous series, and does not rely on supramolecular structure peculiarities. We previously developed an equation for n-alcohols H_{vap}=37,3+4,75(n_C–1), kJ/mol [1], but this equation does not take into account deviations from the dependence linearity for alcohols with n_C >13 [1]. It was noted that H_{vap} correlates with t_{bp}: for n-alkanes with R=0,979, for n-alcohols with R=0,997. The better correlation for alcohols is explained by the fact that for them both H_{vap} and t_{bp} have a character close to linear with synchronous oscillations. For n-alkanes, H_{vap} and t_{bp} do not have significant fluctuations, but if for H_{vap} the dependence is almost linear, then for t_{bp} it is close to exponential.

Nevertheless, the relationship between H_{vap} and t_{bp} is widely used in computation-

al methods, but requires separate approaches for polar and nonpolar liquids. The best alternative is considered to be the method based on the Laidler bond extended additivity, which takes into account the solvent polarity, 165 input parameters using the software environment, divides the molecule into constituent conditional functional groups, applies certain descriptors for them, which ensures an error of up to 1 %, but the method does not consider the supramolecular structure [4]. We improved the existing calculation methods and developed a universal, more complex formula using additional coefficients for predicting the H_{vap} of different homologous classes [1]. Due to the reliance on t_{bp}, this calculation method partially approximates some fluctuations of H_{vap}, but does not take into account their cause in the form of supramolecular structure features.

The statistical associative theory based on the molecules coarse-grained model is used to model liquids and predict their parameters wide range [5–10]. The corresponding model describes the molecule as a hard balls set that replace a functional group [5, 8, 9] or several framework hydrocarbon atoms of 2–4 pieces each [5, 6]. A certain matrix is filled with formed sets of balls. The model allows predicting such substance parameters as a density, vaporization heat, surface tension, solvation energy, internal diffusion coefficient: for alcohols [5], alkanes [6] and even polymer compounds [10]. But this method has a number of disadvantages: the atoms grouping into balls occurs in the "manual" mode, and results obtained do not reflect the certain parameters actual fluctuation, each compound is modeled individually, for example, octacosane with n_C=28 [7]. Due to the description discreteness, this technique does not work for short molecules: models have been developed for alcohols, starting with ethanol, for alkanes – with pentane. Due to the atoms grouping into "balls", this technique indirectly takes into account effects of electron density redistribution in the molecule and partially – intermolecular interaction, but this does not modulate the features associated with the cluster structure alternation in homologous series. For example, this method does not allow to describe the decrease in the «long» alcohols density.

For the substances solid state, an amorphous or crystalline structure is noted. Studies have shown that melting temperatures (t_{mp}) values are not correlated with the molecular structure, but mainly with a dimeric or other supramolecular structure with a clear coordination number. For example, a gold cluster has a t_{mp} that coincides with the t_{mp} of lump gold starting from the atoms number in the cluster – 1000 [11]. Moreover, the change in the substance crystalline structure often occurs at a slightly higher temperature than t_{mp} [12]. The liquid state is a mixture of clusters and individual molecules [13], as the liquid temperature increases, the ratio between them changes. Evaporation in the stable dimers form is known for some substances (formic acid) [14]. These works do not shed light on the connection between the supramolecular structure and the substance properties. It is the detection and analysis of the substance properties oscillation dependence that shows changes in the cluster structure [15], and the monomolecular state does not describe this phenomenon.

In most cases, gas systems are characterized by a monomolecular state. But for combustion processes, it was established that the autoignition temperature (t_{ai}) of mixed organic solvents behaves like the azeotropic solutions characteristic temperatures, that is, it can be higher or lower than components [16]. This is explained by clustering, and according to the ratio of components mole fractions, the coordination number for different solvents varies within 20–50. That is, the azeotrope behaves according to certain properties as a new chemical compound, which is determined by the formation of an atypical cluster. The clusters presence for the gaseous state can be explained by analo-

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

gy: one of flaming combustion stages, as well as coal spontaneous combustion, is the unstable organic peroxides formation [17, 18]. But these works do not consider the supramolecular structure influence on the combustion occurrence. Therefore, taking into account the substance cluster structure makes it possible to predict both t_{mp} [15] and combustion processes [19]. But these works did not use the analytical comparison possibility of various physico-chemical quantities parameters to establish the supramolecular structure features.

We have previously determined the smallest supramolecular structure that determines the solubility maximum proportion [1]. The model assumes the solute coordination number from 1 to 17 and the associated water molecules number according to the principle: 4 lateral water molecules near each carbon atom of the hydrocarbon molecule and additionally 2 more molecules on the end groups, as well as between the hydrocarbon molecules in the cluster. Moreover, it turned out that molecules of methanol, ethanol, and propanol do not combine into a cluster, but are associated with water molecules each separately. But according to the "alcohol solution in a water" model, there is still a maximum solubility for these compounds. Then, at alcohol higher concentrations, the solution should have alcohol clusters centers in addition to the micelle-like structure. But this model is not suitable for describing the individual liquids supramolecular structure.

The research current state on modeling the substances liquid state in order to predict their properties demonstrates either an approximation approach or an attempt to describe the supramolecular structure «force fields». Both approaches have a lack of accuracy [5, 18] due to the fact that they do not track the causes, and therefore do not use the mechanisms for taking into account deviations from the smooth dependence for the substance physico-chemical parameters in homologous series. Currently, a modeling method the cluster structure of the substance using the cluster equivalent length as a modulating parameter is being developed. But this technique does not yet have clear mechanisms for predicting parameters for which there are no experimental data, although it has mechanisms for describing the corresponding dependencies profile, taking into account anomalies.

Thus, the scientific problem of developing effective modeling mechanisms and mathematical description of smallest supramolecular structures of hydrocarbon liquids for predicting the substance parameters, including those describing the fire and explosion hazard, needs to be solved. Solving this problem involves establishing deviations from the smooth change of physicochemical properties parameters in hydrocarbons homologous series and establishing correspondences to them in the form of molecule conformal changes and changes in the supramolecular structure organization scheme with the parameter determination that reflects such changes. As a parallel path, it is necessary to note the finding properties possibility that have the deviations same type from the main tendency of dependence, which will allow establishing proportionality between them with a high correlation degree.

3. The purpose and tasks of the research

This work purpose is to establish correspondences between the changes nature in the substance same physicochemical parameters and the influence mechanisms on these parameters of the substance supramolecular structure in the calculated dependencies form using the example of n-alkanes and n-alcohols homologous series.

To achieve the purpose, the following tasks solution is provided:

– to analyze the relationship between the same physicochemical parameters

change nature in n-alkanes and n-alcohols homologous series and to propose calculation models;

– to invent the taking into account possibility supramolecular structures in methods of predicting certain physicochemical parameters of n-alkanes and n-alcohols.

4. Research materials and methods

The research object is the hydrocarbons physicochemical properties.

The research subject is the correlation dependence between the hydrocarbons physicochemical properties parameters.

The research hypothesis is the possibility of detecting synchronous anomalies in the substance physicochemical properties some parameters change as a supramolecular structure peculiarities consequence, which will allow establishing improved correlation dependencies, as well as taking into account these anomalies in the calculation by introducing the «cluster length» parameter.

The research method is to conduct the substance properties changes comparative analysis by the modulating parameter – the hydrocarbons carbon atoms number and the improved modulating parameter development – the cluster length.

The organic substances basic class is alkanes; alcohols are widely studied substances with the oxygen content. Therefore, normal structure alkanes and alcohols physical, chemical, and fire hazard properties with the carbon atoms number up to 20 were investigated in this paper, that is, 40 compounds are investigated. The simplest way to compare dependencies is graphically. A comparison of n-alkanes and n-alcohols physicochemical properties, the profile (linear or exponential), the amplitude and fluctuation of these dependencies, as well as the search for mechanisms for predicting corresponding parameters according to the general calculation principle.

The substance supramolecular structure description according to the parameter that demonstrates the largest fluctuation is adopted as the modeling basic principle. Previously, we described the change in the t_{mp} of hydrocarbons several homologous series according to this principle [1, 2, 15]. Connection in a cluster other than the hydrocarbon molecule terminal carbon shortens the cluster longest carbon chain, so t_{mp} decreases. That is, side links relative to the cluster longest chain are not taken into account. If the cluster coordination number increases, the cluster length and t_{mp} increase. For modeling the n-alkanes shortened chain, a restriction is adopted: the clustering point cannot move more than chain half. Then the need for chain greater shortening to describe a certain dependence can be achieved by taking into account bending, globulization or other molecule conformational changes that can affect its equivalent length. Thus, a cluster consists of two or more monomers. Under the clustering condition by last groups of normal structure molecules – the cluster length (n_{Ceq}) is determined by multiplying the number of molecule framework atoms (the molecule length n_C) by the coordination number K; in the clustering case not by the final carbon atom, for a linear structure cluster (not cyclic), the shortened monomer length is determined, multiplied by «K–1», then one molecule full length is added.

In order to analyze and take into account the cluster structure, we previously developed [15] the "melting ease" indicator $n_M=n_{Ceq}M^{0.2}$, on the which basis, taking into account the cluster molar mass M, a universal formula for the hydrocarbons t_{mp} predicting was created: $t_{mp}=101{,}85\ \ln(n_M)–452{,}37$, ^oC. This formula, in the analysis reverse order, helps in modeling the hydrocarbon particular cluster structure. At the same time,

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

such a supramolecular structure is chosen that, for a cluster with a certain coordination number and M, forms such the cluster length that corresponds to t_{mp}.

Changes in physical properties following parameters of n-alkanes and n-alcohols were studied (according to PubChem and NIST data [20, 21]): melting t_{mp}, boiling t_{bp}, flash t_{fp}, autoignition temperatures t_{ai}, density ρ, solubility in a water γ, viscosity ν, surface tension σ, vaporization heat H_{vap}. These parameters comparison was carried out according to the absolute value, then the simplest scaling of one of parameters was carried out as an amendment to the general formula. Then, possible molecular and supramolecular effects were considered to describe the dependence anomalies. The only indicator for which it is difficult to conduct the graphical dependence visual analysis and comparison between homologues is solubility, since it varies by 7 orders of a magnitude (even without taking into account the unlimited solubility of first three n-alcohols); therefore, γ was analyzed as a function: $f(\gamma)=6\gamma^{0.1}$.

5. Analysis results of the relationship between hydrocarbons physicochemical parameters

We investigate the hypothesis that for substance properties adequate prediction, it is necessary to model the supramolecular structure. Differences in it and conformational changes of molecules can be reflected by calculating the equivalent cluster length n_{Ceq}. But first, it is necessary to consider the corresponding dependences on the carbon atoms number for normal structure compounds.

If we consider the process of solubility in a water, the ratio of 1 mol of an alcohol (alkane) to 1 mol of a water, when each hydrocarbon molecule is associated with one water molecule (or options: 2 to 1 mol and 1 to 2 mol) seems ideal. But then the solubility maximum mass concentrations would be to some extent proportional to the carbon atoms number in the molecule. However, solubility decreases much faster. According to the analysis, the ratio of the water molar mass to the alcohol molar mass from n-butanol to n-eicosanol decreases by less than a magnitude order, while the solubility decreases by 7 magnitude orders (similarly for alkanes, but starting with methane), Fig. 1. This may indicate the longer molecules clustering at some point along the carbon chain length in addition to the final group association with hydroxyl groups or instead of this clustering type. It is also possible that the indicated effect reduces the alcohols hydrogen bond intensity, and, accordingly, the solubility.

But the decrease in the solubility is most likely related to slightly different processes. For example, it is known that some substances extremely small concentrations change the entire solution properties. That is, the water supramolecular structure is modulated according to the dissolved molecule structure. This means that a micelle-like shell is set up around it.

Data on the hydrocarbons solubility γ in Fig. 1 are given in the function form $K_\gamma = 6\gamma^{0.1}$. In this form, γ of n-alkanes and n-alcohols in the range of n_C=4–16 behave identically, and for some compounds with the same carbon atoms number, they coincide, which made it possible to develop a generalized approximation dependence with R=0,988 and an error of 17 % [20, 21]. The curves similarity indicates the micelle-like structures similarity of considered hydrocarbons solutions with the same carbon chain length; it also turns out that the "OH" group of alcohols takes the water molecule place between monomers in the hydrocarbon cluster linear structure (compared to alkanes). For high concentrations of short n-alcohols, the micelle-like structures absence can be predicted – which can explain the unlimited solubility, and for long n-alkanes –

globulization, which shortens the carbon chain and causes the overall dependence fluctuation. The single peak for n-alkanes at n_C=13 is interesting, which is similar to the single peak for n-alcohols at n_C=15. This can be explained by the fact that, according to the accepted model, the alkane monomer is surrounded on both sides along its length by water molecules, and in the alcohol case, by OH bridges. Then, for the monomer length of «15», another "pentane" effect can occur due to the addition of one more freedom degree. On the other hand, the final OH group changes the electron density distribution along the molecule length.

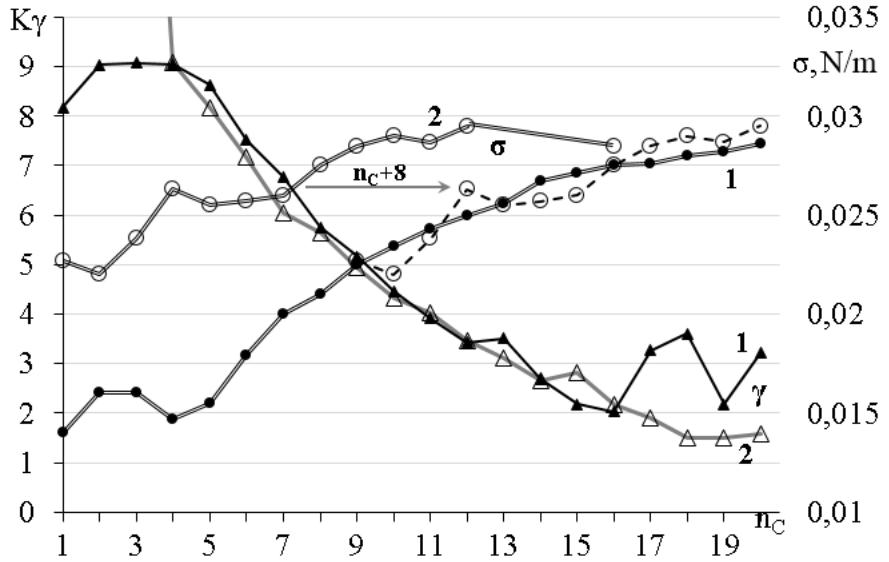


Fig. 1. Solubility in water (γ) and surface tension (σ) of alkanes (1) and alcohols (2)

For the investigated homologous classes of liquids, the opposite anomaly is noticeable in the region n_C=1–3, namely: unlimited γ for n-alcohols, and underestimated relative to the general trend of γ for n-alkanes. This can be explained by the fact that for alkanes solutions, as well as for the t_{mp} [1], for methane and ethane, a model with a higher coordination number worked; at the same time, for the first three n-alcohols homologues – a monomeric model.

In the same length range, there is an inversely proportional anomaly for the surface tension σ – slightly lower values relative to the trend for n-alcohols, and slightly higher values for n-alkanes, Fig. 1. Also, pronounced fluctuation of σ is noticeable for n-alcohols and less noticeable for n-alkanes. Separate data for hexadecanol, in addition, indicate the growth cessation of σ (or dependence fluctuation) in the n-alcohols homologous series, which correlates with a simultaneous decrease in the density. For σ n-alkanes and n-alcohols, a generalized calculation formula can be proposed, assuming that the alcohol carbon chain is 8 links longer than the molecular structure suggests:

$$\sigma=6\cdot10^{-7}n_C^4-3\cdot10^{-5}n_C^3+4\cdot10^{-4}n_C^2-1{,}3\cdot10^{-3}n_C+0{,}0158,\ \text{N/m}. \quad (1)$$

The formula approximates the dependence for σ with R^2=0,98, but does not reflect vibrational features, since it takes into account the molecule length, not the cluster

The vaporization heat growth (H_{vap}) in the studied hydrocarbons series turned out to be the most linear dependence, Fig. 2. But anomalies are also noticeable for the H_{vap} change: for light alkanes (similarly to γ and σ) there are slight deviations for alcohols according to the «pentane» effect principle, for long alcohols – starting from n_C=13 (while t_{mp} already exceeds the standard temperature).

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

The dependences inclination angle for alkanes and alcohols is the same, which makes it possible to superimpose them and establish a calculation permanent correction relative to n-alkanes for n-alcohols: a) «n_C+6», b) 2 «$H_{vap\ alk}$+30». The dependence for n-alkanes can be described by the equation: H_{vap}=5,0076n_C+0,9121, kJ/mol, which provides R^2=0,99. But this approach does not approximate the dependence anomalies for n-alcohols, because it does not take into account the peculiarities of their supramolecular structure (for n-alkanes no significant anomalies were noticed).

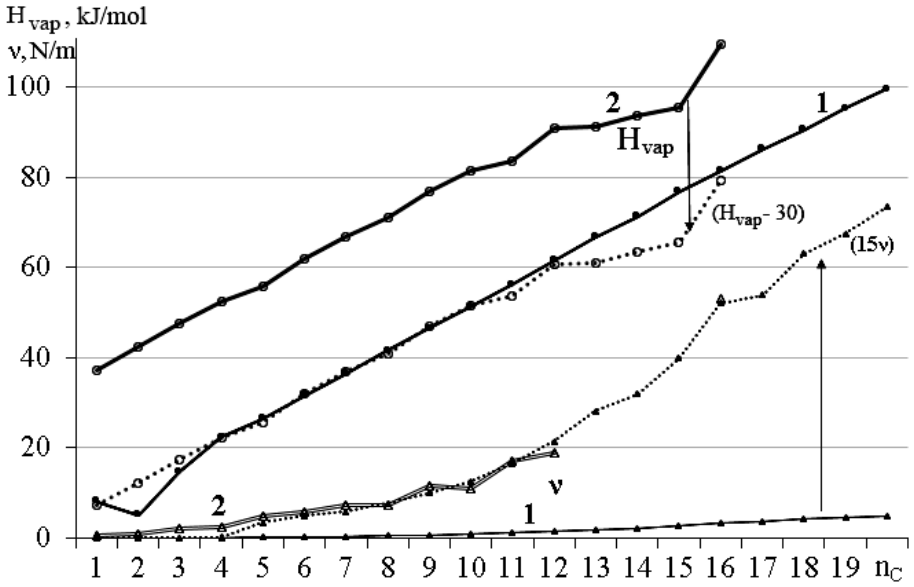


Fig. 2. Proportionality of viscosity and vaporization heat of n-alkanes and n-alcohols

The n-alkanes and n-alcohols viscosity ν has a significant difference, as well as fluctuations and the both dependences linear nature absence. Taking into account the proportionality between them, the formulas system can be proposed: for n-alcohols ν_{alc}=0,2498n_C^2–1,2536n+2,1192, recalculation for n-alkanes $\nu_{alk}=\nu_{alc}/15$, with R^2=0,99. This formula also does not describe oscillations in homologous series.

Substances characteristic temperatures and their description are of the particular interest for the fire and man-made safety areas, (Fig. 3): t_{mp} and t_{bp} determine the substances behavior during emergency situations or fire, and t_{fp} and t_{ai} are directly fire hazard parameters. These temperatures ratio for n-alkanes and n-alcohols is given.

Of n-alkanes and n-alcohols t_{mp} has an identical character with synchronous fluctuations, but with a higher value for n-alcohols by 30–60°C and a more intense overestimation of t_{mp} for the first two homologues (methanol and ethanol). This relationship can be described by the equation, K: $T_{mp_{alc}}=T_{mp_{alk}}^{0,97}$+79, with R=0,996 and an average error of 3,7 K, the largest for methanol – 17,1 K. The methanol anomaly for t_{mp} can be explained by that it has a higher molar mass than methane. The methane anomaly for t_{mp} was previously explained by the clusters hexameric structure in contrast to other homologues [15]. The curves synchronicity indicates these substances supramolecular structure principles similarity in the solid state.

Within the n-alkanes and n-alcohols homologous series, t_{mp} and t_{fp} have an identical character. For n-alcohols, three areas of the dependence change are noticeable: n_C=1–10 (almost linear), n_C=10–15 (almost linear with a different slope angle), n_C=15–20 (oscillating), but with R=0,99 a linear approximation works, K: $T_{bp_{alc}}$=18n_C+318 and $T_{fp_{alc}}$=0,6$T_{bp_{alc}}$+77.

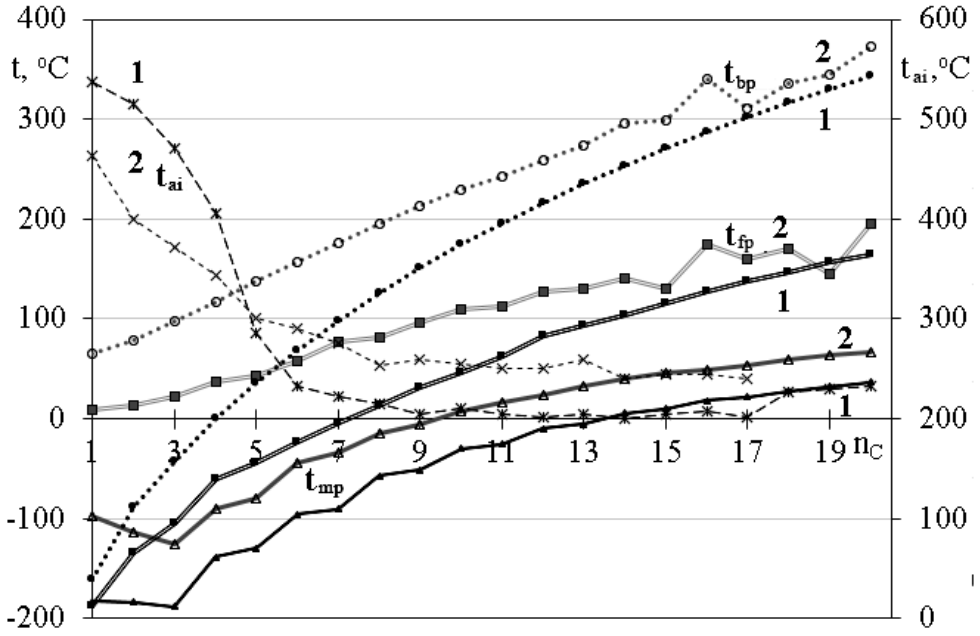


Fig. 3. N-alkanes (1) and n-alcohols (2) characteristic temperatures

The t_{fp} change in the n-alkanes homologous series has features relative to t_{mp} and t_{bp}: there is a slight fluctuation up to n_C=4, but without overestimated values for the t_{mp} methane and ethane; the graph is smoother, but there are also two linear segments (more pronounced than for n-alcohols) with n_C=4–12 and with n_C=12–20 (and for n_C=4–12 the t_{fp} slope angle coincides with the n-alcohols t_{bp} slope angle). Regardless of the t_{bp} n-alkanes dependence smoothness, it was possible to describe it only by a 3rd degree polynomial: $t_{bp}=0{,}0567n_C^3-2{,}7741n_C^2+60{,}515n_C-206{,}75$ with $R^2=0{,}999$, an average error of 3,5°C, the largest – 12,6°C (methane); then $t_{fp}=0{,}7t_{bp}-75$ °C with R=0,99 and an average error of 4,4 °C, the largest – 18,8 °C (butane). The n-alcohols t_{mp} fluctuation becomes less noticeable after n_C=8, for n-alkanes – after n_C=17.

The change in t_{bp} and t_{fp} in the n-alkanes and n-alcohols homologous series turned out to be the fundamentally different: methane and methanol t_{bp} and t_{fp} differ by approximately 200 °C. In addition, t_{bp} and t_{fp} of alcohols grow according to a dependence close to linear (which is logical – as proportionality to the molar masses growth in the homologous series); n-alkanes characteristic temperatures approach these lines asymptotically. Moreover, for n-alkanes, these dependences fluctuations are almost not noticeable, and for heavy n-alcohols there is a strong oscillation.

With regard to t_{ai}, at first glance the dependences for n-alkanes and n-alcohols have a similar character, but with a values different gradient within the homologous series. A more detailed analysis shows that for n-alcohols the graph has greater oscillation, as well as linearity in segments up to and after n_C=8 (taking into account the OH group, the "framework" length is 9). For n-alkanes, the linear character is observed in the segment n_C=9–17.

It is possible to analyze the hydrocarbons characteristic temperatures differences, Fig. 4: $\Delta t_{bp\text{-}fp}= t_{bp}-t_{fp}$, $\Delta t_{bp\text{-}mp}=t_{bp}-t_{mp}$, $\Delta t_{fp\text{-}mp}=t_{fp}-t_{mp}$. The presence of Δt close values can become the basis for creating a generalized calculation dependence. But cross-dependencies $\Delta t_{bp\text{-}mp}(n_C)$, $\Delta t_{fp\text{-}mp}(n_C)$ have significant differences and begin to approximately coincide only after n_C=9. And dependencies for t_{bp} and t_{fp} coincide quite closely, so they can be described by a general equation: $\Delta t_{bp\text{-}fp}=6{,}7105n_C+55{,}069$ with

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

R^2=0,9575. From this equation, a dependence can be obtained for predicting the n-alkanes and n-alcohols t_{fp} based on the values of t_{bp} and the molecule length n_C: $t_{fp}=t_{bp}-(6{,}7105n_C+55{,}069)$, but this dependence does not reflect the fluctuations of the t_{fp} change in homologous series.

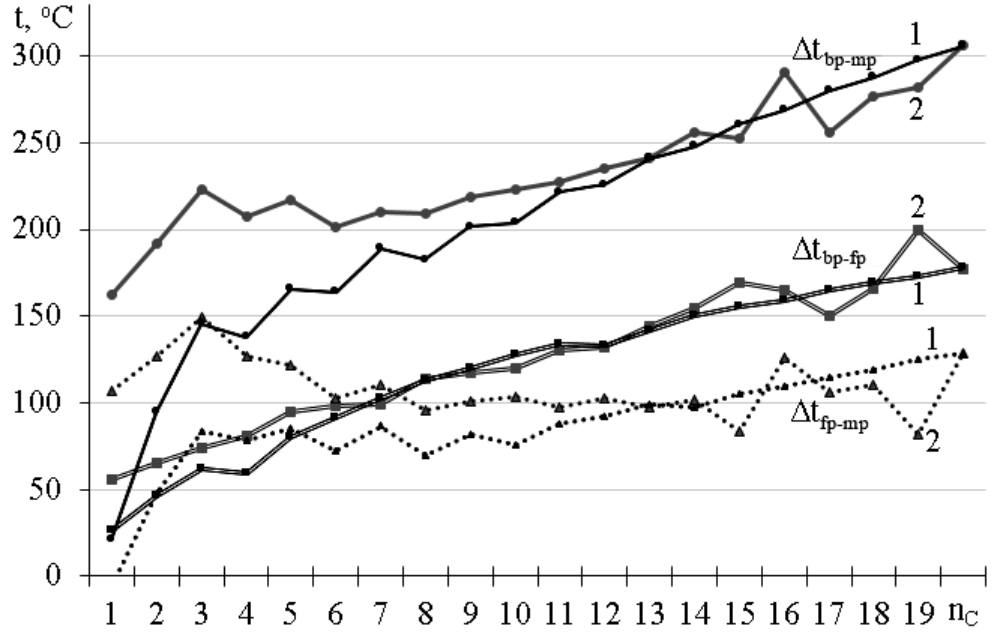


Fig. 4. The differences ratio in the n-alkanes (1) and n-alcohols (2) characteristic temperatures

There is another analysis direction of characteristic temperatures cross-dependencies, which concerns the air mixtures minimum temperature for initiating combustion (t_{ai}), Fig. 5: $\Delta t_{ai\text{-}bp}=t_{ai}-t_{bp}$, $\Delta t_{ai\text{-}mp}=t_{ai}-t_{mp}$. It turned out that starting from n_C=6, the dependences for "$t_{ai}-t_{bp}$", "$t_{fp}-t_{mp}$" behave identically for n-alkanes and n-alcohols, but a greater values coincidence is observed for the dependence «$t_{ai}-t_{mp}$».

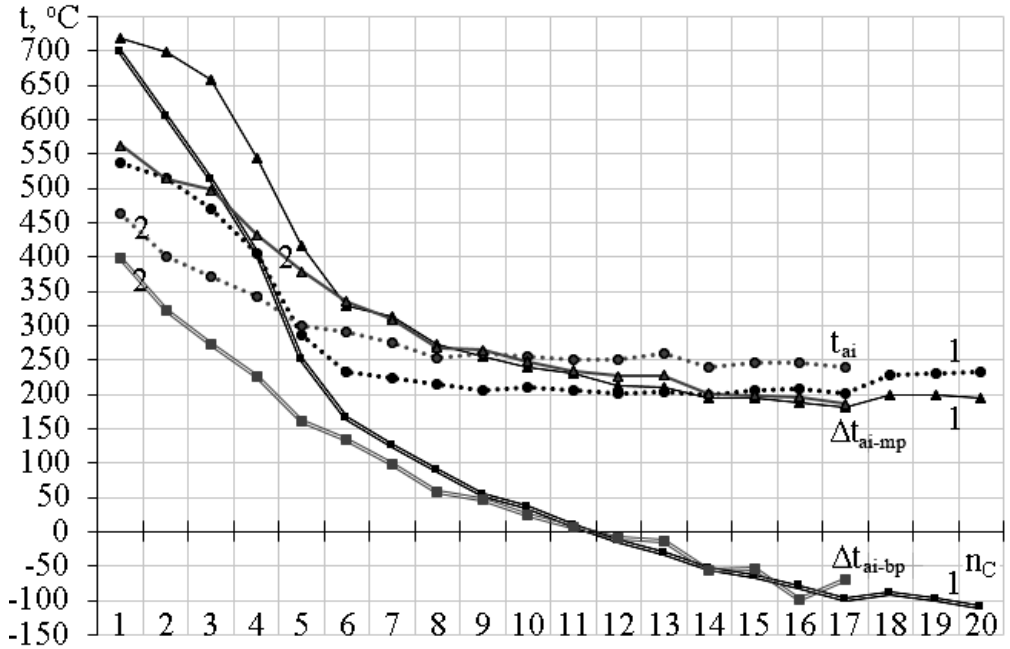


Fig. 5. Correlation between temperatures of the physical state change and combustion initiation for n-alkanes (1) and n-alcohols (2)

For n-alcohols, this dependence can be represented by a polynomial $\Delta t_{ai\text{-}mp}=1{,}852n_C^2-56{,}113n_C+620{,}84$ with $R^2=0{,}9885$. This dependence also works for n-alkanes with $n_C > 5$ (the standard technique also offers dependences for $n_C<5$ and $n_C>5$ [18]). Then the function $t_{ai}(t_{mp}, n_C)$ for n-alcohols, as well as for n-alkanes with $n_C>5$, is described by the equation: $t_{cc}=t_{пл}+1{,}852n_C^2-56{,}113n_C+620{,}84$, °C.

The dependence $\Delta t_{ai\text{-}bp}(n_C)$ for n-alcohols (and for n-alkanes with $n_C>5$) can be approximated by a polynomial $\Delta t_{ai\text{-}bp}=1{,}4631n_C^2-55{,}313n_C+426{,}57$ with $R^2=0{,}9863$. Then prediction of t_{ai} by t_{bp} and n_C for n-alcohols, as well as n-alkanes with $n_C>5$, can be carried out using the equation: $t_{ai}=t_{bp}+1{,}4631n_C^2-55{,}313n_C+426{,}57$, °C. Fig. 5 does not show the $\Delta t_{ai\text{-}fp}(n_C)$ dependences for substances under study, they are similar to those shown, but differ in the amplitude: for n-alcohols, as well as n-alkanes with $n_C>5$, $t_{ai}=t_{fp}+1{,}2949n_C^2-45{,}651n_C+472{,}41$, °C.

The predicting possibility the autoignition temperature (at which the chemical oxidation reaction rate in the combustible substance air mixture is sharply accelerated) based on the phase transitions temperature can be explained only by the fact that the oxidation process is accompanied by the similar supramolecular structures formation compared to the substance condensed state.

6. Results of taking into account the hydrocarbons supramolecular structure in calculations

The n-alcohols density ρ reflects the liquid state supramolecular structure peculiarities, as it has significant fluctuations of dependence, Fig. 6. For n-alkanes, this parameter has a smooth change. Both dependences grow exponentially, but for n-alcohols after $n_C=13$ an anomalous decrease in ρ is observed.

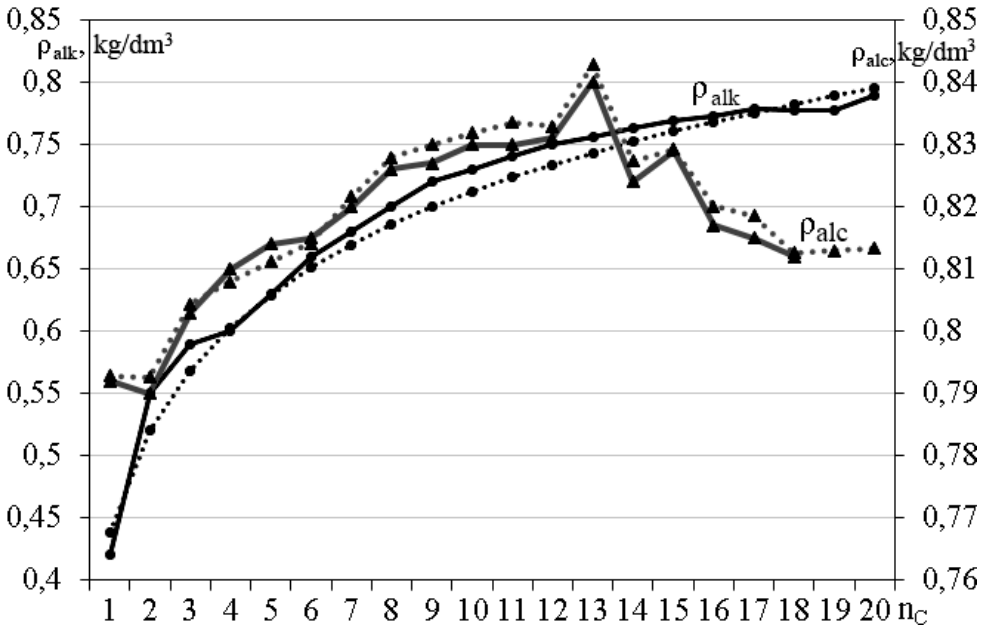


Fig. 6. Reference (—) and calculated (•••) n-alkanes and n-alcohols density values

For the solid state of alkanes, alkenes, alkynes, and cycloalkanes, we have developed a system for modeling supramolecular structures [2], Tabl. 1. This technique has been adapted to estimate the hydrocarbons solubility in a water [1]. For n-alcohols and n-alkanes in aqueous solutions, cyclic clusters are accepted, where monomers are combined by water molecules: for n-alcohols, the first three homologs are accepted as mon-

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

omers; for longer n-alcohols, the clusters coordination number increases with a maximum for octadecanol; for some clusters it is accepted shortening scheme; for n-alkanes to n-octane, the cluster scheme remained close to the solid state, later, as for n-alcohols, the coordination number increased with a maximum for penta- and hexadecane.

Tabl. 1. Hydrocarbons supramolecular structures models[1] for different states

n-alcohols																				
n_{C+OH}	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
water solution	1 3	1 4	1 5	2 -2	2 -2	2 -1[3]	2 9	2 10	3 -2	3 12	3 13	4 14	5 -1	6 16	5 17	8 18	11 19	17 20	16 21	14 22
liquid state	6 2	4 3	4 4	4 -1	4 -2	4 -3	4 -3	4 -3	4 -4	4 -5	4 -6	4 -5-1[4]	4 -6	4 -6-4	4 -6-5	4 -10-3	4 -12-2	4 -13-3	4 -14-3	4 -15-3
solid state	6 2	4 -1	3 -1	3 -1	3 -2	3 -2	3 -3	3 -2	3 -3	3 -3	3 -4	3 -4	3 -5	3 -5	3 -6	3 -7	3 -8	3 -9	3 -10	3 -10
n-alkanes																				
n_C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
water solution	6 2[5]	3 3	2 4	2 -1	2 -2	2 -2	2 -2	2 9	3 -2	3 -1	4 -2	4 13	4 -1	6 15	9 16	9 17	3 18	2,5[2] 19	7 20	3 -1
liquid state	2 1	2 2	2 3	2 4	2 5	2 6	2 7	2 8	2 9	2 10	2 11	2 12	2 13	2 14	2 15	2 16	2 17	2 18	2 19	2 20
solid state	6 1	3 2	2 3	2 4	2 -1	2 6	2 -1	2 8	2 -1	2 10	2 -1	2 12	2 -1	2 14	2 -1	2 16	2 -1	2 18	2 -1	2 20

[1] – coordination number / monomer length or its shortening principle;
[2] – fractional number – a clusters mixture; [3] – clustering at site "2", monomer shorter at "1";
[4] – chain shortening due to molecule globulization and clustering (according to note 3);
[5] – n-alkanes aqueous solutions are calculated as cyclic clusters, which length takes into account H_2O

N-alcohols clusters modeling in the liquid state was carried out according to the change nature in their density in the homologous series and was based on developed models for the solid state, Tabl. 1.4 and Tabl. 1.5 [1]. H-alcohols in the solid state are modeled as trimers with a clustering point near the molecule center (except for methanol and ethanol – the linear hexamer and tetramer scheme worked for them). The main difference for the liquid state was the need to adjust the monomers length for long n-alcohols clusters with n_C>11 to account for bending or molecules globulation. For an alcohols aqueous solution, this turned out to be unnecessary – no conformal changes occur, water molecules prevent this.

Since the n-alkanes density has no significant anomalies, this indicates the identity of the liquid state supramolecular structure. Therefore, there is no difference in the character between dependence profiles for t_{bp} and t_{mp}, Fig. 3, except for methane and ethane; for them, the difference between these parameters is reduced; in addition, there is no noticeable fluctuation of the dependence for t_{bp}. For the alkanes solid state, we previously proposed the models of smallest clusters: methane – hexamer, ethane – trimer, others – dimers with alternating clustering points for «even» and «odd» molecules [2]. The «odd» molecules, starting with pentane, turned out to be shortened by "1". Then, for the liquid state, only a dimeric structure can be proposed with an identical clustering principle – by terminal methyl groups. An instantaneous transition from dimers to the monomeric state is unlikely, as it would be accompanied by evaporation sharp intensification or by sublimation.

In order to take into account, the cluster structure influence on the hydrocarbons properties, we have developed the indicator "melting ease" [15]: $n_M=n_{C_{eq}}M^{0.2}$, where

n_{Ceq} and M – the cluster equivalent length and its molar mass. Based on it, a formula was developed to describe ρ, which works with different constants for n-alkanes and n-alcohols: for n-alkanes $\rho=0{,}23\log_{10}n_M+0{,}3$, for n-alcohols $\rho=0{,}08\log_{10}n_M+0{,}67$, кg/dm^3, which provides a total R=0,992.

The n-alcohols t_{mp} can be calculated using the previously developed formula for n-alkanes [1]: $t_{mp}=102{,}46\ln(n_M) - 455{,}22$, °C. However, the «oscillating» model for n-alcohols did not work, the «stepped» model worked, as well as for aqueous solutions, Table 1; moreover, the option when the clustering point is moved further from the final group for long molecules turned out to be closer. For n-eicosanol (n_{C+OH}=21) in Table 1, it is proposed to shift the clustering point to «10» along the carbon chain, since «11» is already more than half the chain, although this would reduce the calculation error from 3 °C to 1,5 °C. Most likely, this is possible because there is a strong substituent at the molecule end. The coordination number for most n-alcohols turned out to be «3» (trimeric structure is typical for many hydrocarbon liquids, for example, nitromethane [22]), for ethanol «4», for methanol «6».

The n-alcohols t_{mp} calculation according to the above formula with reference to the clusters specified structure and using the indicator «melting ease» has R=0,997, the average deviation – 3,7 °C, the maximum – 13,2 °C (for n_C=2–5). The deviations presence indicates the model incompleteness. For example, if for ethanol we take 2 instead of 3 points of shortened clustering in the tetramer (or a cyclic tetramer with 2 points of shortened clustering out of 4), then the cluster length increases to 10, and the error decreases from 9 °C to 1,7 °C; if a cyclic trimer is accepted for n-propanol, then the cluster length decreases to 9, and the error – from 13,2 °C to 2,4 °C; the cyclic structure reduces the error for n-butanol and n-pentanol as well. Such measures increase the correlation with reference data [20, 21] to R=0,999, reduce the average deviation to 1,8 °C, and the maximum to 5 °C.

If we return to the graphs for t_{bp}, t_{fp} and H_{vap} of n-alcohols in Fig. 2 and 3, a synchronous deviation from linearity is noticeable for molecules with $n_C > 10$. To take into account such an anomaly within the dependence limits on the carbon atoms number in the molecule, it is possible to apply a cluster length reduction from the maximum possible as an amendment to the calculation of $\Delta n_{Ceq}=K\cdot n_C - n_{Ceq}$ (varies from «0» to «69», K is the clustering coefficient): $T_{bp}=20n_C+316-\Delta n_{Cек}$, K ($t_{fp}$ related to t_{bp} proportionally); $H_{vap}=5{,}6n_C+31- 0{,}4\Delta n_{Ceq}$, kJ/mol, which provides R=0,99.

Thus, taking into account the substance supramolecular structure by calculating the cluster equivalent length improves the result of approximating various methods a certain actual dependence for hydrocarbons different homologous series.

7. Research results discussion of correlations hydrocarbons properties

According to research results, based on the curves synchronicity, the physicochemical dependencies parameters were identified, which can be used for mutual forecasting. On some dependencies oscillation basis, an assumption is made regarding the substance cluster structure with a clustering different principle of hydrocarbons homologous series various representatives. Such substance parameters become a supramolecular structure indicator, which allows for its simulation. Based on this method, 14 mathematical expressions were obtained, which work with a good correlation, taking into account the molecule length (carbon atoms number) and using mutual correlations between parameters. The developed approach main difference is the search for ways to take into account the substance supramolecular structure. For this, a developed

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

melting ease index is used, which takes into account the length and molar mass of the simulated cluster. The cluster length is not always proportional to the monomer length, and the clustering coefficient may differ for homologues. This approach becomes more sensitive to substance properties than basing calculations on monomer state parameters. The dependences pulsating nature of certain properties made it possible to model the n-alkanes and n-alcohols clusters lengths for liquid and solid states, as well as for their aqueous solutions. This approach made it possible to describe the pulsating dependence for the liquid state density.

The correlations between n-alkanes and n-alcohols physicochemical properties both within the homologous series and between them were studied: t_{mp}, t_{bp}, t_{fp}, t_{ai}, ρ, γ, ν, σ, H_{vap}, using the molecule or possible supramolecular formations (clusters) length as a basic parameter. At the analysis first stage, general correlations and their description were subject, at the second – the correlations search taking into account the dependencies anomalies in the pulsating deviations form from the general trend. This question was solved on the basis of supramolecular structure features modeling based on a certain parameter of the substance properties, which has pronounced manifestations of dependence certain anomalies. The specified approach has given the positive results number.

An urgent issue is ensuring the converting possibility of known values of a certain physicochemical parameter of a substances certain class to an another homologous class similar indicator. This is possible if this parameter change profile coincides for two or more substances classes with repetition of all or most of anomalies of dependence, but differs in the absolute value. The similarity can be traced for t_{mp}, H_{vap}, γ, σ and ν of n-alkanes and n-alcohols; and for water solubility γ, the dependences almost overlap, Fig. 1 (deviation areas are for short alcohols and long alkanes). The generalized calculating method γ, taking into account the water solution cluster structure, was developed in a previous work [1], and the cluster models are listed in the Tabl. 1.

For the viscosity ν, the 15-fold proportionality $\nu_{alk}=\nu_{alc}/15$ works, and the ν calculation of n-alcohols can be carried out by the equation, which provides the total $R^2=0,99$ for alkanes and alcohols: $\nu_{alc}=0,2498n_C^2-1,2536n+2,192$ Н/м. But this equation does not take into account values fluctuations in homologous series.

Changes in H_{vap} values of n-alkanes and n-alcohols without taking into account fluctuations have linear parallel dependencies. A dependency works for n-alkanes: $H_{vap}=5,0076n_C+0,9121$, kJ/mol. Then n-alcohols H_{vap} can be recalculated based on n-alkanes H_{vap} by horizontal or vertical dependence shift with $R^2=0,99$. Principle «1» provides consideration in the n-alkanes formula of the n-alcohol imaginary length $n_{Cim}=n_{Calc}+6$, principle «2» provides a correction for the difference in amplitudes $H_{vap\cdot alc}=H_{vap\cdot alk}+30$. But the linear approach does not take into account supramolecular structure peculiarities and the graphs corresponding pulsations. Also, with the «horizontal shift» help, it is possible to generalize the surface tension calculation for n-alkanes and n-alcohols homologous series: in equation (1) to calculate σ of n-alcohols, apply $n_{Cim}=n_{Calc}+8$, which provides $R^2=0,98$.

The differences in the t_{mp} parameter are larger values for n-alcohols, a slightly smaller oscillation amplitude than in n-alkanes, and a more pronounced negative temperature effect for methanol and ethanol relative to methane and ethane. This similarity is reflected by the formula, K: $T_{mp.\ alc}=T_{mp.\ alk}^{0,97}+79$, with R=0,996, an average error of 3,7 K, which is the largest for methanol – 17,1 K. This equation modulates the oscillatory dependence for n-alcohols due to the oscillatory dependence profile for n-alkanes.

There are no coincidences for t_{fp} and t_{bp} between alkanes and alcohols homologous series. Within homologous series, they are similar: for n-alcohols they are almost linear, for n-alkanes they are exponential. The linear approximation for n-alcohols can be represented by equations: $T_{bp.\,alc}=18n_C+318$, $T_{fp.\,alc}=0{,}6T_{bp.\,alc}+77$, K, which provides R=0,99. These dependences do not have oscillations similar to t_{mp}, and both are correlated with H_{vap} with deviation areas repetition from the general linearity. For t_{bp} n-alkanes: $t_{bp}=0{,}0567n_C^3-2{,}7741n_C^2+60{,}515n_C-206{,}75$; the 3rd degree polynomial works with R= 0.999, the average error – 3,5 °C and the maximum for methane – 12,6 °C (but for $n_C>20$ this formula will give inflated values); conversion to tsp: $t_{fp}=0{,}7t_{bp}-75$ °C with R=0,99, average error – 4,4 °C, maximum for butane – 18,8 °C. The last dependence peculiarity for n-alkanes is that the methane t_{fp} is lower than its t_{mp}. This phenomenon is cyclic compounds characteristic, for example, benzene and cyclohexane, which indirectly confirms the assumption about the methane cluster hexameric structure in the solid state [2].

A method for building general cross-dependencies that works for both n-alkanes and n-alcohols has been developed: graphical dependences are constructed for the characteristic temperatures differences and if they coincide between homologous series and a general calculated dependence is established. The change in the difference between the characteristic temperatures in one homologous series was investigated Δt (t_{mp}, t_{fp}, t_{bp}, t_{ai}). As modulating parameters for practical calculations, t_{bp} or t_{mp} are usually used. From the fire safety view point, it is of the interest to find new ways of forecasting and increasing the calculating certain parameters accuracy, for example, t_{fp} and t_{ai}. Corresponding convergences were found. During the analysis, we looked for cross-dependencies, which will have a close character for alkanes and alcohols of the normal structure. In the «triangle» «t_{mp}–t_{fp}–t_{bp}» such closeness was revealed only by the dependence Δt_{bp-ai}. This makes it possible to create a universal dependence for the t_{fp} studied substances predicting, based on the t_{bp} and the carbon atoms number in the molecule n_C: $t_{fp}=t_{bp}-(6{,}7105n_C+55{,}069)$, °C, $R^2=0{,}95$. The equation disadvantage is the t_{fp} pulsations indirect description in homologous series, which works only for cases when the pulsations are synchronous with the dependence for t_{bp}. Existing mathematical models for this [18], based on the t_{bp} value, use the individual homologous series coefficients, therefore they are not universal.

It was also established that the t_{ai} of n-alkanes and n-alcohols can be expressed in terms of t_{mp}, t_{fp} or t_{bp} with $R^2=0{,}98$: $t_{ai}=t_{mp}+1{,}852n_C^2-56{,}113n_C+620{,}84$; $t_{ai}=t_{bp}+1{,}4631n_C^2-55{,}313n_C+426{,}57$; $t_{ai}=t_{fp}+1{,}2949n_C^2-45{,}651n_C+472{,}41$, °C. But for n-alkanes, these formulas work for molecules with a carbon chain length of $n_C>5$ (the standard method also cannot describe the curve for t_{ai} of n-alkanes with one dependence, so separate formulas are proposed for $n_C<5$ and $n_C>5$ [18]). The developed formulas are not only of practical interest – as a method of estimating t_{ai}, but also of scientific interest, since the relationship existence between completely different parameters is shown: the oxidation reaction self-acceleration temperature, the vapor formation temperature in the lower flammability limit, phase transitions temperatures. Such a relationship testifies to the principles similarity of the supramolecular structures formation in substance different phase states and during the oxidation processesi nitiation in a combustible substance mixture with air. Parallel studies showed that the n-alkanes and n-alcohols water solubility also correlates with similar structures. Then a combustible air mixture at temperatures close to t_{ai} can be compared with an oxygen «solution» ac-

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

cording to clustering mechanisms.

The cluster structure modeling of n-alkanes and n-alcohols in water solutions, liquid and solid states was carried out, Tabl. 1. For n-alkanes in the solid state, we proposed a dimeric structure, except for methane and ethane (hexamer and trimer) with alternating structure of «even» and «odd» molecules with clustering on the last or penultimate carbon, starting with pentane [2]. For the n-alkanes liquid state, we assume only a dimeric structure with clustering by the final carbon. On the basis of the previously developed indicator of «ease of melting», molar masses and cluster lengths of studied hydrocarbons in the liquid state, the dependence for density ρ is described, which provides R=0,992: for n-alkanes $\rho=0{,}23\log_{10}n_M+0{,}3$, for n-alcohols $\rho=0{,}08\log_{10}n_M+0{,}67$, кг/дм^3. These calculations correlation increases if the trimeric model of the cluster cyclic structure is applied to the ethane and propane liquid state. One can also consider "shortened" clusters trimeric schemes for the following homologues of n-alkanes.

Regarding the t_{mp} formation of a substance, we previously had assumed that substances with the same equivalent length and molar mass of the cluster will have the same t_{mp} [2]. This means that to each t_{mp} of a substances given homologous class corresponds to a cluster with a certain coordination number and a aggregating molecules way into some smallest structure. Based on this principle, the "ease of melting" index and a universal formula for predicting t_{mp} were developed. The problem of such calculation is the cluster structure modeling. Taking into account the n-alkanes and n-alcohols curves synchronicity it was expected that the supramolecular structure same feature that was predicted for alkanes would work for calculating the t_{mp} of n-alcohols using the universal formula. But for better modeling, a step scheme for clusters structure changing with the clustering point gradual shift closer to the molecule middle worked, Tabl. 1.

In order to take into account, the underestimated relative to the values linear dependence of t_{fp}, t_{bp} and H_{vap} of long n-alcohols (Fig. 2 and 3), a correction was applied, which describes a decrease in the cluster length due to clustering not by molecule finite group or long molecule globulization: $\Delta n_{Ceq}=К\cdot n_{C+OH}-n_{Ceq}$ (varies between 0–69 for $n_C=1–20$). Based on this indicator and the proportional dependence on the carbon atoms number in the molecule, formulas have been developed that provide R=0,99: $T_{bp}=20n_C+316-\Delta n_{Ceq}$, K; $H_{vap}=5{,}6n_C+31-0{,}4\Delta n_{Ceq}$, kJ/mol; t_{fp} can be obtained through t_{fp} using cross-dependency. It was also found that ρ pulsations for n-alcohols are shifted by one molecular length link relative to pulsations of t_{fp}, t_{bp} and H_{vap}, as if ρ is modulated by the carbon chain length, and t_{fp}, t_{bp}, H_{vap} are modulated by the hydroxyl-carbon chain length. If for the last case a molecule length correction by one position is applied, then the calculation correlation can be increased.

The application limitations of this researche results are due to the fact that only 2 organic compounds main classes were studied – n-alkanes and n-alcohols with n_C up to 20. At the same time, the drawback is the hypotheticality of substance supramolecular structure applied models. The developed models, on the one hand, require experimental confirmation, on the other hand, they already work and provide acceptable coefficients of correlation and deviation during calculations. In addition, proposed solutions are based on individual experimental facts, namely, on the investigated some liquids cluster structure. Thus, in nitromethane and alcohols, the trimeric and tetrameric structures presence, as well as certain intermolecular bonds types, on which these structures are built, was found [13, 22]. But even these researches only hypothetically

describe the corresponding clusters structure [22]. Therefore, at the moment, we consider the developed technique primarily as a way of predicting the substance properties and an alternative to the liquids statistical associative theory, which uses a molecule coarse-grained model that is not directly related to the molecules or supramolecular formations structure.

The formation reasons of linear or exponential trends of changes in the actual dependences for physicochemical quantities indicators in homologous series, the supramolecular structures non-equal influence on different indicators, the alcohols some indicators modulation according to the carbon chain length, and others – to the carbon-hydroxyl chain length, have not been finally established, which requires the further research. The hydrocarbons «melting ease» indicator is most likely not correct to use for the liquid state, water solution, «zero» moment of the combustion initiation, but the similarity of the supramolecular structures organization principles for same molecules allows using such an approach. During current research, it was not possible to describe the density change in n-alkanes and n-alcohols homologous series using supramolecular structure indicators with one calculated dependence. The structure and length modeling method of clusters, for example, the linearity or cyclicity of supramolecular structures, also needs clarification.

The development of this research can involve several directions: experimental confirmation or refinement of the applied models for the supramolecular structure, methodology improvement for the smallest cluster length determining, approximation dependencies improvement for the description of substance physicochemical properties.

8. Conclusions

1. The changes analysis in 9 physicochemical properties parameters in n-alkanes and n-alcohols homologous series using a selection of 40 compounds revealed similarities between some parameters, as well as oscillatory and pulsating features that cannot be explained and taken into account by the direct correlation. The n-alcohols viscosity described by the 2nd degree polynomial with the recalculation possibility to n-alkanes due to the reduction coefficient «15», characterized by the general R^2=0,99. The n-alkanes and n-alcohols vaporization heats are described by a linear function with R^2=0,99 provided that the n-alcohols length n_C is substituted into the formula as "n_C +6" or the correction "+30 kJ/mol" is applied. The dependence for surface tension has an exponential character, which is described for n-alkanes by the 4th degree polynomial with R^2=0,98, this formula also allows predicting the dependence for n-alcohols, if their length n_C is considered greater than 8. Based on the melting points changes synchronicity in alkanes and alcohols homologous series, an equation was developed that allows calculating the n-alcohols melting points of with R=0,996 based on the data for n-alkanes, taking into account the dependence oscillation. The common dependence existence for n-alkanes and n-alcohols between melting and flash points, autoignition and other characteristic temperatures of liquids, taking into account the carbon atoms number has been proven, which provides R^2=0,95–0,98. These calculations take into account substance supramolecular structure peculiarities only indirectly.

2. Based on the relationship existence between the autoignition temperature and the melting and boiling points, a conclusion was made about the fundamental similarity of corresponding supramolecular structures. Such structures models have been developed for the solid, liquid state, and water solubility, taking into account different coordination numbers, changes in the clustering point according to the carbon chain length,

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

and long molecules globulization. On the basis of the supramolecular structure index «melting ease», the dependences for the n-alkanes and n-alcohols density with R=0,99, the change in the n-alcohols melting points with R=0,999 are described. The anomalies for the boiling point, flash point and vaporization heat of long n-alcohols in the values decrease form relative to the general linear dependence is described by taking into account the cluster structure through the cluster length decrease parameter relative to its linear structure, which provided R=0,99. Supramolecular structures modeling showed that no globulization effect occurs in aqueous solutions for long molecules.

References

1. 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

2. 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

3. Jovanović, J., Grozdanić, D. (2010). Reliable prediction of heat of vaporization of n-alkanes at 298.15 K. Journal of the Serbian Chemical Society. J. Serb. Chem. Soc., 75(7), 997–1003. doi: 10.2298/JSC091123067J

4. Santos, R., Leal, J. (2012). A Review on Prediction Methods for Molar Enthalpies of Vaporization of Hydrocarbons: The ELBA Method as the Best Answer. J. of Physical and Chemical Reference Data, 41, 043101. doi: 10.1063/1.4754596

5. Wan, M., Song, J., Yang, Y., Gao, L., Fanga, W. (2021). Development of coarse-grained force field for alcohols: an efficient meta-multilinear interpolation parameterization algorithm. Physical Chemistry Chemical Physics, 23, 1956–1966. doi: 10.1039/d0cp05503d

6. Yaxin, A., Karteek, K. B., Sanket, A. D. (2018). Development of New Transferable Coarse-Grained Models of Hydrocarbons. J. Phys. Chem., 122, 28, 7143–7153. doi: 10.1021/acs.jpcb.8b03822

7. Dai, L., Chakraborty, S., Wu, G., Ye, J, La, Y., Ramanarayan, H. (2022). Molecular simulation of linear octacosane via a CG10 coarse grain scheme. Physical Chemistry Chemical Physics, 24(9), 5351–5359. doi: 10.1039/D1CP05143A

8. Song, J., Wan, M., Yang, Y., Gao, L., Fang, W. (2021). Development of accurate coarse-grained force fields for weakly polar groups by an indirect parameterization strategy. Physical Chemistry Chemical Physics, 23(11), 6763–6774. doi: 10.1039/D1CP00032B

9. Conway, O., An, Y., Bejagam, K. K., Deshmukh, S. A. (2020). Development of transferable coarse-grained models of amino acids. Mol. Syst. Des. Eng., 5, 675. doi: 10.1039/C9ME00173E

10. Pervaje, A. K., Walker, Ch. C., Santiso, E. E. (2019). Molecular simulation of polymers with a SAFT-γ Mie approach. Molecular Simulation, 45(14–15), 1223–1241. doi: 10.1080/08927022.2019.1645331

11. Laguna, A. (2008). Modern Supramolecular Gold Chemistry: Gold-Metal Interactions and Applications. Weinheim: Wiley-VCH. doi: 10.1002/9783527623778

12. Kahwaji, S., White, M. (2021). Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties. Molecules, 26, 6635. doi: 10.3390/molecules26216635

13. 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

14. Millet, D. B. (2015). Sources and sinks of atmospheric formic acid. Atmos. Chem. Phys, 15, 6283–6304. doi: 10.5194/acp-15-6283-2015

15. Tregubov, D., Sharshanov, A., Sokolov, D., Tregubova, F. (2022). Forecasting the smallest super molecular formations for alkanes of normal and isomeric structure. Problems of Emergency Situations, 35, 63–75. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-5

16. Tregubov, D., Tarahno, O., Kireev, O. (2018). Influence of cluster structure of liquids technical mixtures on the value of characteristic temperatures. Problems of Emergency Situations, 2(28), 99–110. doi: 10.5281/zenodo.2598054

17. Boot, M., Tian, M., Hensen, E., Mani, S. (2017). Impact of fuel molecular structure on autoignition behavior: design rules for future high performance gasolines. Progress in Energy and Combustion Science, 60, 1–25. doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.001

18. Tarakhno, O. V., Trehubov, D. H., Zhernokl′ov, K. V., Kovrehin, V. V. (2020). Osnovni polozhennya protsesu horinnya. Kharkiv: NUTSZ Ukrayiny, Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382

19. 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-u0fBZB

20. Search for Species Data by Chemical Name. NIST Chemistry WebBook. U. S. Department of Commerce. doi: https://doi.org/10.18434/T4D303

21. Quickly find chemical information from authoritative sources. Pubchem. U. S. National Library of Medicine. Available at: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/

22. Reichel, M., Krumm, B., Vishnevskiy, Yu., Blomeyer, S., Schwabedissen, J., Stammler, H.-G., Karaghiosoff, K. (2019). Solid-State and Gas-Phase Structures and Energetic Properties of Dangerous Methyl and Fluoromethyl Nitrates. Angewandte Chemie International Edition, 58(51), 18557–18561. doi: 10.1002/anie.201911300

Д. Г. Трегубов, *к.т.н., доцент, докторант*
Л. М. Трефілова, *д.т.н., с.н.с., проф. каф.*
Ю. К. Гапон, *к.т.н., доц. каф.*
Н. В. Мінська, *д.т.н., доцент, доц. каф.*
Д. Л. Соколов, *к.т.н., доцент, викл. каф.*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

СПІВВІДНОШЕННЯ НЕЛІНІЙНОСТЕЙ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ Н-АЛКАНІВ ТА Н-СПИРТІВ

Встановлено відповідності між нелінійністю зміни фізико-хімічних параметрів речовини та механізми впливу на них надмолекулярної будови речовини у вигляді розрахункових залежностей для н-алканів та н спиртів. Досліджено подібність, особливості зміни та кореляції між параметрами: температури плавлення, кипіння, спалаху, самоспалахування, густина, розчинність у воді, в'язкість, теплота випаровування, поверхневий натяг. Отримано 14 розрахункових залежностей, які прогнозують ці параметри на підставі встановленої подібності між ними та довжини молекули або кластеру з достатніми коефіцієнтами кореляції. Для в'язкості, теплоти випаровування та поверхневого натягу встановлено загальні залежності зміни, але без врахування коливальних відхилень. Отримано розрахункові крос-залежності між характерними температурами речовини: між температурами плавлення н-алканів та н-спиртів, між температурами кипіння та спалаху для гомологічний рядів, між температурою самоспалахування та плавлення (або спалаху, або кипіння). Пояснено таку кореляцію тим, що у різних станах речовини та під час ініцію-

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

вання горіння формуються надмолекулярні структури за близьким принципом. Проведено моделювання таких структур для твердого, рідкого стану та розчинності у воді з урахуванням різного координаційного числа, глобулізації та зміни точки кластеризації за довжиною молекули. На базі такого моделювання та показника «легкість плавлення» розроблено залежності для розрахунку густин алканів та спиртів, описано температури плавлення спиртів з відбиттям нелінійностей залежностей. Для температури кипіння, спалаху і теплоти випаровування н-спиртів відхилення від лінійності враховано впровадженням параметру зменшення довжини кластеру. Дослідження показало, що модулювання розглянутих залежностей за довжиною кластеру дозволяє описати їх аномалії та підвищує збіжність розрахунку.

Ключові слова: н-спирти, н-алкани, фізико-хімічні властивості, кластер, модель, нелінійність, збіжність розрахунку

Література

1. 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

2. 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

3. Jovanović J., Grozdanić D. Reliable prediction of heat of vaporization of n-alkanes at 298.15 K. Journal of the Serbian Chemical Society. 2010. № 75(7). P. 997–1003. doi: 10.2298/JSC091123067J

4. Santos R., Leal J. A Review on Prediction Methods for Molar Enthalpies of Vaporization of Hydrocarbons: The ELBA Method as the Best Answer. Journal of Physical and Chemical Reference Data. 2012. № 41. 043101. doi: 10.1063/1.4754596

5. Wan M., Song J., Yang Y., Gao L., Fanga W. Development of coarse-grained force field for alcohols: an efficient meta-multilinear interpolation parameterization algorithm. Physical Chemistry Chemical Physics. 2021. № 23. P. 1956–1966. doi: 10.1039/d0cp05503d

6. Yaxin A., Karteek K. B., Sanket A. D. Development of New Transferable Coarse-Grained Models of Hydrocarbons. J. Phys. Chem. 2018. № 122. Vol. 28. P. 7143–7153. doi: 10.1021/acs.jpcb.8b03822

7. Dai L., Chakraborty S., Wu G., Ye J, La Y. H., Ramanarayan H. Molecular simulation of linear octacosane via a CG10 coarse grain scheme. Physical Chemistry Chemical Physics. 2022. № 24(9). P. 5351–5359. doi: 10.1039/D1CP05143A

8. Song J., Wan M., Yang Y., Gao L., Fang W. Development of accurate coarse-grained force fields for weakly polar groups by an indirect parameterization strategy. Phys. Chem. Chem. Phys. 2021. № 23(11). P. 6763–6774. doi: 10.1039/D1CP00032B

9. Conway O., An Y., Bejagam K. K., Deshmukh S. A. Development of transferable coarse-grained models of amino acids. Mol. Syst. Des. Eng. 2020. № 5. P. 675. doi: 10.1039/C9ME00173E

10. Pervaje A. K., Walker Ch. C., Santiso E. E. Molecular simulation of polymers with a SAFT-γ Mie approach. Molecular Simulation. 2019. № 45(14–15). P. 1223–1241. doi: 10.1080/08927022.2019.1645331

11. Laguna A. Modern Supramolecular Gold Chemistry: Gold-Metal Interactions and Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 505 p. doi: 10.1002/9783527623778

12. Kahwaji S., White M. Organic Phase Change Materials for Thermal Energy Storage: Influence of Molecular Structure on Properties. Molecules. 2021. № 26. P. 6635. doi: 10.3390/molecules26216635

13. Doroshenko I. Yu. Spectroscopic study of cluster structure of n-hexanol trapped in an argon matrix. Low Temperature Physics. 2017. Vol. 3. № 6. P. 919–926. doi: 10.1063/1.4985983

14. Millet D. B. et al. Sources and sinks of atmospheric formic acid. Atmos. Chem. Phys. 2015. № 15. P. 6283–6304. doi: 10.5194/acp-15-6283-2015

15. Трегубов Д. Г., Шаршанов А. Я., Соколов Д. Л., Трегубова Ф. Д. Прогнозування найменших надмолекулярних структур алканів нормальної та ізомерної будови. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 35. С. 63–75. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-5

16. Трегубов Д. Г., Тарахно О. В., Кірєєв О. О. Вплив кластерної будови технічних сумішей рідин на значення характерних температур. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. № 2(28). С. 99–110. doi: 10.5281/zenodo.2598054

17. Boot M., Tian M., Hensen E., Mani S. Impact of fuel molecular structure on autoignition behavior: design rules for future high performance gasolines. Progress in Energy and Combustion Sci. 2017. Vol. 60. P. 1–25. doi: 10.1016/j.pecs.2016.12.001

18. Тарахно О. В., Трегубов Д. Г., Жернокльов К. В., Коврегін В. В. Основні положення процесу горіння. Виникнення процесу горіння. Харків: НУЦЗ України, 2020. 408 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11382

19. 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-u0fBZB

20. Search for Species Data by Chemical Name. NIST Chemistry WebBook. U. S. Department of Commerce. doi: 10.18434/T4D303

21. Quickly find chemical information from authoritative sources. Pubchem. U. S. National Library of Medicine. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/

22. Reichel M., Krumm B., Vishnevskiy Yu., Blomeyer S., Schwabedissen J., Stammler H.-G., Karaghiosoff K. Solid-State and Gas-Phase Structures and Energetic Properties of the Dangerous Methyl and Fluoromethyl Nitrates. Angewandte Chemie International Edition. 2019. № 58(51). P. 18557–18561. doi: 10.1002/anie.201911300

Надійшла до редколегії: 01.03.2024
Прийнята до друку: 10.04.2024

© D. Tregubov, L. Trefilova, N. Minska, Yu. Hapon, D. Sokolov

УДК 313.86

***Д. Ю. Белюченко*[1]**, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-7782-2019)*
***В. М. Стрілець*[1]**, *д.т.н., професор, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-5992-1195)*
***Т. О. Луценко*[1]**, *к.н.держ.упр., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7373-4548)*
***П. О. Корчагін*[2]**, *нач. ГУ* (*ORCID 0009-0004-4126-1781)*
***І. В. Маловик*[3]**, *гол. інспектор апарату ДСНС (ORCID 0009-0009-2319-9730)*
***О. В. Ребров*[4]**, *нач. загону (ORCID 0009-0005-6654-7863)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України*
[2]*ГУ ДСНС України у Луганській області*
[3]*Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС України*
[4]*ГУ ДСНС України у Рівненській області*

ОБГРУНТУВАННЯ НОРМАТИВІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ОПЕРАТИВНИХ РОЗГОРТАНЬ В ЗАСОБАХ БРОНЕЗАХИСТУ

Розроблено науково-методичний апарат обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту та визначено нормативні оцінки для типових варіантів. Для цього було вдосконалено існуючий статистичний метод обґрунтування нормативів шляхом визначення середньозважених оцінок ймовірностей попадання часу оперативного розгортання в засобах бронезахисту в інтервали між нормативами. Це дозволило враховувати різноманіття суджень експертів стосовно цього, яке раніше не брали до уваги. Встановлено, що для обґрунтування шуканих нормативних оцінок необхідно визначити зворотну функцію стандартного нормального розподілу з урахуванням як його параметрів (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення часу здійснення відповідного оперативного розгортання), так і оцінок ймовірності отримання відповідних оцінок у вигляді середньозважених оцінок відповідних часток (частот) всіх можливих результатів, які попадають в інтервали між (до, після) шуканими нормативними оцінками. У відповідності до розробленого методу обґрунтовано нормативи для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до подачі двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант, а також для оцінювання рівня підготовленості до подачі переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант. Їх впровадження буде сприяти усуненню протиріччя між умовами застосування пожежно-рятувальних автомобілів, для яких були розроблені існуючі нормативи, та сучасними умовами, коли є необхідність працювати в умовах можливого бойового ураження.

Ключові слова: норматив, оперативне розгортання, пожежно-рятувальний автомобіль, бронезахист

1. Вступ

Основні нормативні вимоги щодо оперативних розгортань оперативно-рятувальної техніки [1] конкретизовані тільки для умов мирного стану. В той же час, в умовах сьогодення оперативно-рятувальні підрозділи здійснюють близько 200 виїздів на ліквідацію наслідків того, як окупанти обстрілюють населенні пункти та об’єкти інфраструктури [2]. Тобто, оцінювання ефективності оперативних розгортань рятувальної техніки супроводжується протиріччям між умовами застосування цієї техніки, для якої були розроблені існуючі нормативи (в першу чергу це нормативи для оцінювання оперативного розгортання АЦ-40(131)), та сучасними умовами, коли особовий склад оперативно-рятувальних підрозділів є вимушеним здійснювати оперативні розгортання рятувальної техніки в захисному спорядженні в комплекті із засобами бронезахисту.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Діяльність рятувальників в зоні можливого ворожого ураження характеризується тим, що він використовує не тільки загальноприйняті засоби індивідуального захисту, але й засоби противибухового захисту, як правило бронежилети [3]. На цей час особливості оперативної діяльності особового складу оперативно-рятувальних підрозділів в таких умовах ніде не розглядались, хоча не викликає сумніві, що на складність дій вплине як і додаткове навантаження (близько 10 кг), так і обмеження рухомості.

На сьогоднішній день обґрунтування рекомендацій оперативним розрахункам пожежних автомобілів відбувається з урахуванням того, як особовий склад здійснює виконання типові для гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій операції та процеси. Так, в США під час підготовки оперативно-рятувальних підрозділів Федеральне агентство по реагуванню на надзвичайні ситуації [4], яке відповідає за цей напрямок, у відповідності до стандарту NFPA 1500-2002 [5], враховує як пожежну техніку, яка стоїть на озброєнні в підрозділах, так і місцеві особливості. При цьому особливості, що пов'язані із застосуванням засобів бронезахисту особового складу, під час оперативних розгортань не розглядаються.

В [6] розглядаються питання руху пожежних, які використовують засоби індивідуального захисту. Основна увага приділена як стандартним методам відповідних випробувань, так і використанню суб'єктивних експертних оцінок. Проте питання щодо визначення індивідуальних кількісних оцінок для порівняння рівня підготовленості окремих пожежних не розглядались. Хоча в [7] відмічається, що показником кваліфікованого застосування специфічного пожежного обладнання є регламентовані часові стандарти оперативних розгортань як важливих етапів реагування первинних оперативних розрахунків. І це стосується як професійних [8], так і волонтерських [9] підрозділів. В той же час, питання, пов'язані з тим, що дії рятувальників під час оперативних розгортань відбуваються в умовах застосування засобів бронезахисту, не розглядались. Як не розглядаються вони і в базовому стандарті ЄС [10], який вимагає урахування під час підготовки до проведення оперативних розгортань пожежних автомобілів кількості особового складу в оперативних розрахунках (3 в загальноприйнятому пожежному екіпажі або 6 – в так званій, пожежній «ескадрильї») та клас пожежного автомобіля.

Хоча стосовно маркерів фізіологічного стресу пожежного в [11] відмічено, що кількісні оцінки часу виконання типових завдань у процесі дослідження працездатності рятувальника є важливими маркерами, які дозволяють отримати кількісні показники для визначення критеріїв успіху. Аналогічна теза була підтверджена в [12] стосовно виконання тестових завдань авіаційними рятувальниками. Але в [13] питання градації пожежних не конкретизувались.

В [14], де розглядаються питання безпечного та ефективного управління фізичною підготовкою працівників екстремальних служб, відмічено, що зацікавлені сторони на експертному рівні у стилі світлофору можуть узгодити стандарти для оцінювання рівня підготовленості та відповідні порогові значення. Аналогічним чином це було зроблено і в [15], де розглядалась відповідність фізичних здібностей обраним початковим завданням реагування пожежних. Але і в першому, і в другому випадку питання визначення початкових критичних значень для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників з урахуванням особливостей, які можна біло б пов'язувати хоча б по аналогії з роботою в засобах бронезахисту, не розглядались.

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

В Україні існує науково-методичний апарат обґрунтування нормативів бойового розгортання пожежних автомобілів, який спирається на показники розподілу (β-розподіл, коли воно складається до 4–5 операцій [16], та нормальний – для більш складних випадків [17]), але ситуація щодо того, яким чином можна не призначити, а обґрунтувати ту долю результатів, яка стане основою для конкретизації долі результатів, яка приходиться на відповідний норматив, не розглядалась.

Таким чином, важливою та нерозв'язаною частиною проблеми підвищення ефективності діяльності оперативно-рятувальних підрозділів ДСНС в умовах можливого бойового ураження ворогом без зниження рівня безпеки особового складу є відсутність нормативів для оцінювання рівня підготовленості до відповідних дій, у тому разі оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів розрахунками, які одягнені в захисне спорядження, що включає засоби бронезахисту.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка науково-методичного апарата обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

1. Розробити методику обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

2. Визначити нормативи для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до здійснення типових варіантів оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – оперативне розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

Предмет дослідження – нормативні оцінки ефективності часу оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів рятувальниками в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

Основна гіпотеза дослідження –використання зворотної функції стандартного нормального розподілу з урахуванням як його статистичних параметрів, так і експертних суджень щодо ймовірності отримання відповідних оцінок рівня підготовленості особового складу до оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту для обґрунтування нормативів.

Перевірка гіпотези здійснювалась наступним чином:

– визначення вихідних даних для отримання нормативів за рахунок удосконалення існуючого статистичного методу обґрунтування нормативів шляхом отримання середньозважених оцінок ймовірностей попадання часу оперативного розгортання в засобах бронезахисту в інтервали між нормативами:

– статистичного аналізу результатів типових варіантів оперативного розгортання пожежних автомобілів особовим складом в захисному спорядженні із засобами бронезахисту та визначення середньозважених оцінок;

– отримання шуканої нормативної оцінки з подальшим її коригуванням з урахуванням умов кратності та запам'ятовуваності.

В експериментальних дослідженнях брали участь випробувальні з числа курсантів третього та четвертого курсів НУЦЗ України. Вони в зимовий час виконували наступні варіанти оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів (ПРА) середнього класу в захисному спорядженні із засобами бронезахисту:

– варіант 1 – подача двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою ПРА на пожежний гідрант (ПГ);

– варіант 2 – подача переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою ПРА на ПГ.

5. Розробка методики обґрунтування нормативів оцінювання оперативних розгортань в засобах бронезахисту

5.1. Визначення вихідних даних для обґрунтування нормативів

У відповідності до центральної граничної теореми [18], враховуючи те, що оперативне розгортання пожежних автомобілів вимагає від особового складу виконання конкретної послідовності різноманітних дій, які додатково ускладнюються використанням засобів бронезахисту, можна припустити, що закон розподілу часу оперативного розгортання буде нормальним. Це дозволяє використовувати відомий вираз [18] для визначення імовірності улучення випадкової величини в заданий інтервал:

$$p_5 = p(t \le t_5) = \Phi\left(\frac{t_5 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right), \quad (1)$$

$$p_4 = p(t_4 < t \le t_5) = \Phi\left(\frac{t_4 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) - \Phi\left(\frac{t_5 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) = \Phi\left(\frac{t_4 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) - p_5\ , \quad (2)$$

$$p_4 = p(t_3 < t \le t_4) = \Phi\left(\frac{t_3 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) - \Phi\left(\frac{t_4 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) = \Phi\left(\frac{t_3 - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right) - (p_4 + p_5)\,, \quad (3)$$

де $t_{5(4,\,3)}$ – значення часу бойової роботи, при досягненні якого норматив може бути оцінений на «відмінно» («добре», «задовільно»), с; $\bar{t}_{op}$ – математичне очікування часу оперативного розгортання, с; σ_{op} – середньоквадратичне відхилення часу оперативного розгортання, с; $\Phi\left(\frac{t_{5(4,3)} - \bar{t}_{op}}{\sigma_{op}}\right)$ – відповідне значення функції стандартного нормального розподілу.

З (1–3) видно, що параметри математичного очікування $\bar{t}_{op}$ та середньоквадратичного відхилення σ_{op} можуть бути визначеними за результатами відповідних експериментальних досліджень, аналіз яких поряд з цим повинен підтвердити нормальність розподілу. В той же час застосування (1–3) для отримання нормативних оцінок $t_{5(4,3)}$ вимагає знання й показників ймовірностей отримання відповідних оцінок $p_{5(4,3)}$. Якщо їх представити у вигляді відповідних часток (частот) всіх

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

можливих результатів, які попадають в інтервали $(t \le t_5)$, $(t_4 < t \le t_5)$, $(t_3 < t \le t_4)$, то для їх визначення по аналогії з [19] можна використовувати середньозважені оцінки $\langle \tilde{p}_5; \tilde{p}_4; \tilde{p}_3 \rangle$, сума яких з урахуванням долі, яка приходиться на незадовільну оцінку $\tilde{p}_2$, дорівнює одиниці.

Для їх визначення кожний j-ий експерт надає відповідні індивідуальні оцінки $\langle p_{5\,j}; p_{4\,j}; p_{3\,j} \rangle$. Це дозволяє усереднене очікуване значення $\tilde{P}_{5(4;3)}$ розглядати у вигляді середньовиваженої оцінки за спостереженнями всіх n експертів:

$$\tilde{p}_{5(4;\,3)} = \sum_{j=1}^{n} \upsilon_{5(4;\,3)j}(\tilde{p}_{5(4;\,3)}) \cdot \bar{p}_{5(4;\,3)}, \tag{4}$$

де $\upsilon_{5(4;\,3)j}(\tilde{p}_{5(4;\,3)})$ – ваговий коефіцієнт j-го експерта при оцінці $\tilde{p}_{5(4;\,3)}$, який розраховується як:

$$\upsilon_{5(4;\,3)j}(\tilde{p}_{5(4;\,3)}) = \frac{1}{(p_{5(4;\,3)j} - \bar{p}_{5(4;\,3)})^2 \cdot \sum_{j=1}^{n} \frac{1}{(p_{5(4;\,3)j} - \bar{p}_{5(4;\,3)})^2}}, \tag{5}$$

де $\bar{p}_{5(4;3)} = \dfrac{\sum_{j=1}^{n} p_{5(4;\,3)j}}{n}$.

Після того, як будуть виключені аномальні значення оцінок, що задовольняють нерівності:

$$\left| p_{5(4;3)\,j} - \tilde{p}_{5(4;3)} \right| \ge \alpha \cdot \sigma(\tilde{p}_{5(4;3)}), \tag{6}$$

де $\alpha = 2{,}5 \div 3{,}0;\ \sigma(\tilde{p}_{5(4;3)}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} (p_{5(4;\,3)j} - \bar{p}_{5(4;\,3)})^2}$,

та, у разі необхідності, повторного розрахунку $\langle \tilde{p}_5; \tilde{p}_4; \tilde{p}_3 \rangle$, середньовиважені оцінки відповідних часток (частот) можливих результатів можна використовувати для розрахунку нормативів у відповідності до (1–3).

5.2. Процедура отримання нормативної оцінки

Використання (1–3) для отримання нормативів спирається на гіпотезі, що розподіл часу оперативного розгортання пожежного автомобіля в захисному спорядженні із засобами бронезахисту відповідає нормальному закону, та знанні параметрів цього розподілу. Враховуючи незначну кількість (n<30) експериментальних результатів, які можна отримати під час експериментальних досліджень, перевірку на нормальність з одночасним отриманням його параметрів доцільно виконати за критерієм Шапіро-Уілкі [20]. Для цього необхідно розрахувати математичне очікування виконання кожного варіанту оперативного розгортання:

$$\bar{t}_{OP} = \frac{\sum_{i}^{n} t_{OPi}}{n}, \tag{7}$$

де t_i – час і-го виконання обраного для розгляду варіанту оперативного розгортання, с; середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{OP} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(t_{OPi} - \bar{t}_{OP}\right)^2}, \qquad [c], \tag{8}$$

та

$$n \cdot m_2 = \sum_{i=1}^{n} \left(t_{OPi} - \bar{t}_{OP}\right)^2, \qquad [c^2], \tag{9}$$

де m_2 – вибірковий центральний момент другого порядку, а також проміжну суму:

$$S(OP) = \sum_{i}^{k} a_{n-i+1} \cdot (t_{OP(n-i+1)} - t_{OPi}), \quad [c], \tag{10}$$

де k – індекс, який має значення від 1 до $n/2 = 12$; a_{n-i+1} – коефіцієнт, який має спеціальні значення для обсягу вибірки n (їх значення наведені в табл. 10 [20]).

Якщо у відповідності до табл. 11 [20] для рівня значимості α=0,05 та n:

$$W(OP) = \frac{S^2(OP)}{n \cdot m_2} \geq W_{табл}, \tag{11}$$

розподіл вважається нормальним.

З урахуванням результатів розрахунку середньозважених оцінок $\langle \tilde{p}_5; \tilde{p}_4; \tilde{p}_3 \rangle$ у відповідності до (4–6) та знання параметрів математичного очікування $\bar{t}_{OP}$ (7) та середньоквадратичного відхилення σ_{OP} (8) розподілу експериментальних результатів, шукані нормативні оцінки часу обраного варіанту оперативного розгортання пожежного автомобіля в захисному спорядженні із засобами бронезахисту, використовуючи значення зворотної функції Φ^{-1} стандартного нормального розподілу, бути визначені як:

$$t_5 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_5), \tag{12}$$

$$t_4 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_4 + \tilde{p}_5), \tag{13}$$

$$t_3 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_3 + \tilde{p}_4 + \tilde{p}_5). \tag{14}$$

Для використання отриманих (12–14) нормативних оцінок $\langle t_5; t_4; t_3 \rangle$ у якості нормативів у практичній діяльності їх треба відкоригувати з урахуванням вимог кратності і запам'ятовуваності [16].

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

Таким чином, розроблено науково-методичний апарат обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту, основу якого складає визначення зворотної функції стандартного нормального розподілу з урахуванням як його параметрів (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення часу здійснення відповідного оперативного розгортання), так і оцінок ймовірності отримання відповідних оцінок у вигляді середньозважених оцінок відповідних часток (частот) всіх можливих результатів, які попадають в інтервали між (до, після) шуканими нормативними оцінками.

6. Визначення нормативів для оцінювання типових оперативних розгортань в захисному спорядженні із засобами бронезахист

У відповідності до п. 5.2 отримані експериментальні результати оперативного розгортання ПРА шляхом подачі двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою ПРА на ПГ (табл. 1) та подачі переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою ПРА на ПГ (табл. 2) спочатку у відповідності до (7–11) були перевірені на нормальність розподілу. В узагальненому вигляді отримані показники наведені в табл. 3.

Табл. 1. Експериментальні результати подачі двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою ПРА на ПГ (варіант 1 оперативного розгортання)

Показник	Оперативний розрахунок									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{OPi}, с	122,3	120,1	141,4	138,9	131,6	127,5	123,8	134,9	126,6	117,5

Табл. 2. Експериментальні результати подачі переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою ПРА на ПГ (варіант 2 оперативного розгортання)

Показник	Оперативний розрахунок									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_{OPi}, с	117,9	118,0	104,1	117,6	138,6	114,6	116,6	109,4	119,1	124,4

Табл. 3. Результати перевірки експериментальних результатів на нормальність

Показник	$\bar{t}_{OP}$, с	σ_{OP}, с	σ^2_{OP}, $с^2$	nm_2, $с^2$	S^2 (OP), $с^2$	W (OP)	$W_{табл}$
Варіант 1	128,46	8,04	64,65	581,82	556,34	0,96	0,869
Варіант 2	118,03	9,11	83,04	747,38	669,96	0,90	

Аналіз результатів, які наведені в табл. 2 та табл. 3, показує (рис. 1), що отримані експериментальні розподіли за кожним із розглянутих варіантів відповідають нормальному закону, а визначені параметри математичних очікувань та середньоквадратичних відхилень можна використовувати для розрахунку нормативних оцінок відповідних оперативних розгортань ПРА в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

Результати визначення («викиди» місця не мали) середньовиважених оцінок $\langle \tilde{p}_5; \tilde{p}_4; \tilde{p}_3 \rangle$ за експертними оцінками відповідних часток (частот) можливих резуль-

татів, які надали викладачі кафедри «Пожежної та рятувальної підготовки» Національного університету цивільного захисту України, у відповідності до (4) та (5) наведені в табл. 4.

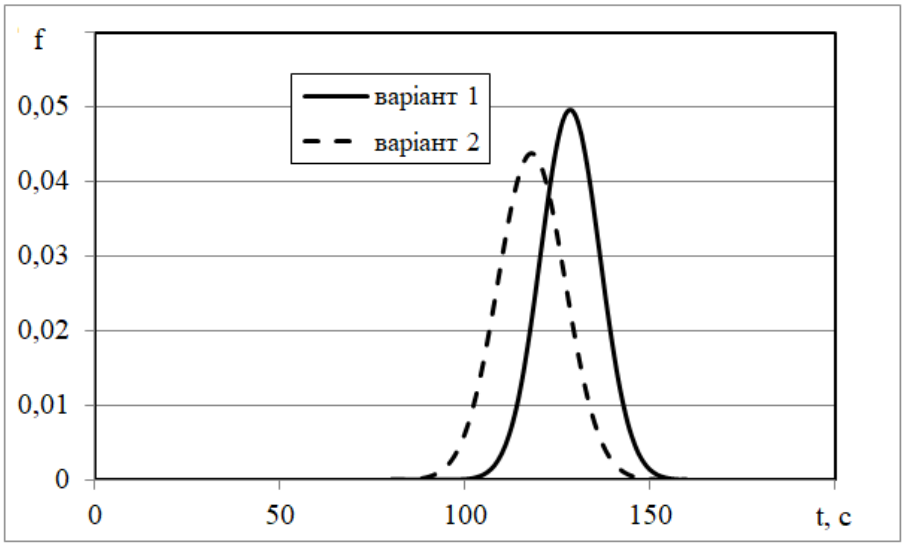


Рис. 1. Розподіл часу виконання оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів взимку в захисному спорядженні із засобами бронезахисту (суцільна лінія – варіант 1; пунктирна – варіант 2)

Табл. 4. Експертні оцінки відповідних часток (частот) можливих результатів та результати їх аналізу

		Експерт, j					
		1	2	3	4	5	6
Експертні оцінки	$p_{5\,j}$	0,2	0,15	0,15	0,2	0,2	0,15
	$p_{4\,j}$	0,4	0,45	0,4	0,3	0,35	0,4
	$p_{3\,j}$	0,3	0,35	0,35	0,4	0,35	0,4
$\upsilon_{5j}(\tilde{p}_5)$		0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
$\upsilon_{4j}(\tilde{p}_4)$		0,298	0,019	0,298	0,012	0,075	0,298
$\upsilon_{3j}(\tilde{p}_3)$		0,007	0,323	0,323	0,013	0,323	0,013
$\tilde{p}_5$		0,175					
$\tilde{p}_4$		0,396					
$\tilde{p}_3$		0,351					

Отримані результати обробки експериментальних даних (табл. 3 і табл. 4) дозволяють визначити у відповідності до (12–14) розрахункові нормативні оцінки обраних для розгляду оперативних розгортань пожежних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту.

$$t_5 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_5) = \\ = \begin{cases} 128{,}46 + 8{,}04 \cdot \Phi^{-1}(0{,}175) = 120{,}95 \text{ с для варіанта 1;} \\ 118{,}03 + 9{,}11 \cdot \Phi^{-1}(0{,}175) = 109{,}51 \text{ с для варіанта 2;} \end{cases} \quad (15)$$

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

$$t_4 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_4 + \tilde{p}_5) =$$

$$= \begin{cases} 128{,}46 + 8{,}04 \cdot \Phi^{-1}(0{,}396 + 0{,}175) = 129{,}90 \text{ с для варіанта 1;} \\ 118{,}03 + 9{,}11 \cdot \Phi^{-1}(0{,}396 + 0{,}175) = 119{,}66 \text{ с для варіанта 2;} \end{cases} \quad (16)$$

$$t_4 = \bar{t}_{OP} + \sigma_{OP} \cdot \Phi^{-1}(\tilde{p}_3 + \tilde{p}_4 + \tilde{p}_5) =$$

$$= \begin{cases} 128{,}46 + 8{,}04 \cdot \Phi^{-1}(0.351 + 0{,}396 + 0{,}175) = 139{,}86 \text{ с для варіанта 1;} \\ 118{,}03 + 9{,}11 \cdot \Phi^{-1}(0.351 + 0{,}396 + 0{,}175) = 130{,}96 \text{ с для варіанта 2.} \end{cases} \quad (17)$$

З урахуванням вимог кратності та запам'ятовування для оперативного розгортання ПРА в захисному спорядженні із засобами бронезахисту взимку, яке передбачає подачу двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою ПРА на пожежний гідрант, для використання в навчальному процесі були прийняті (рис. 2) такі нормативи:

$$t_5(\text{ОР1}) = 120 \text{ с}; t_4(\text{ОР1}) = 130 \text{ с}; t_3(\text{ОР1}) = 140 \text{ с}. \quad (18)$$

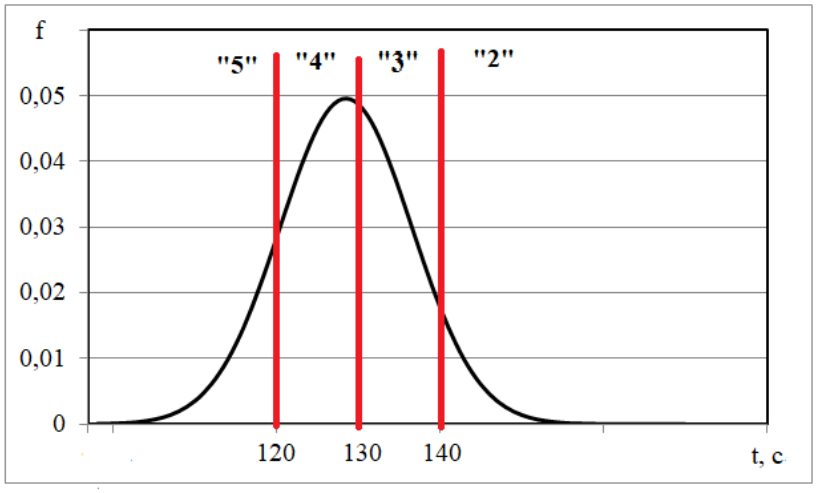


Рис. 2. Визначення нормативів для оцінювання рівня підготовленості до оперативного розгортання пожежно-рятувального автомобіля взимку в захисному спорядженні із засобами бронезахисту за першим варіантом

Поступаючи аналогічним чином, для оцінювання оперативного розгортання ПРА в захисному спорядженні із засобами бронезахисту взимку, яке передбачає подачу переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою ПРА на ПГ, для використання в навчальному процесі рекомендується норматив:

$$t_5(\text{ОР 2}) = 110 \text{ с}; t_4(\text{ОР 2}) = 120 \text{ с}; t_3(\text{ОР 2}) = 130 \text{ с}. \quad (19)$$

Таким чином, за результатами застосування статистичного підходу до аналізу дійсних експериментальних результатів виконання вправи рятувальниками ДСНС та урахування точки зору експертів стосовно кожного нормативу щодо відповідних часток (частот) всіх можливих результат у вигляді середньозважених оцінок отримано нормативні оцінки ($t_5(\text{ОР1}) = 120 \text{ с}; t_4(\text{ОР1}) = 130 \text{ с}; t_3(\text{ОР1}) = 140 \text{ с}$) для оцінюван-

ня рівня підготовленості до подачі двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант, а також нормативні оцінки ($t_5(\text{ОР}2) = 110$ с; $t_4(\text{ОР}2) = 120$ с; $t_3(\text{ОР}2) = 130$ с) для оцінювання рівня підготовленості до подачі переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант.

7. Обговорення отриманих результатів дослідження оперативних розгортань в захисному спорядженні із засобами бронезахист

Проведений аналіз показав, що важливою та нерозв'язаною частиною проблеми підвищення ефективності діяльності оперативно-рятувальних підрозділів ДСНС в умовах можливого бойового ураження ворогом без зниження рівня безпеки особового складу є відсутність нормативів для оцінювання рівня підготовленості до відповідних дій. Це обумовлено протиріччям між умовами застосування цієї техніки, для якої були розроблені існуючі нормативи (в першу чергу це нормативи для оцінювання оперативного розгортання АЦ-40(131)), та сучасними умовами, коли особовий склад оперативно-рятувальних підрозділів є вимушеним здійснювати оперативні розгортання рятувальної техніки в захисному спорядженні в комплекті із засобами бронезахисту.

Виходячи з цього, метою роботи була розробка науково-методичного апарата обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту та визначити нормативні оцінки для типових варіантів. У якості останніх були обрані подача двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант (варіант 1) та подача переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант (варіант 2).

Набула свого підтвердження гіпотеза стосовно того, що показник зворотної функції стандартного нормального розподілу з урахуванням як його статистичних параметрів (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення часу виконання обраного варіанту оперативного розгортання), отриманих з рівнем значимості α=0,05, так і експертних суджень щодо ймовірності отримання відповідних оцінок рівня підготовленості особового складу до оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту у вигляді середньозваженої оцінки можна використовувати для обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості особового складу до дій у відповідних умовах. Застосування нормального розподілу часу оперативного розгортання, оскільки воно складається із виконання конкретної послідовності різноманітних дій, які додатково ускладнені використанням засобів бронезахисту, відповідає судженню центральної граничної теореми.

Процес отримання експериментальних результатів під час проведення обраних варіантів оперативного розгортання пожежно-рятувальних автомобілів показав, що використання особовим складом оперативних розрахунків бронежилетів знизило продуктивність оперативної діяльності внаслідок зниження рухливості, спритності та чіткості рухів, скоротило оглядовість внаслідок обмеження рухли-

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

вості, підвищило дискомфорт та втому рятувальників особливо у разі збільшення кількості пожежних рукавів, а також діставання пожежно-технічного обладнання з верхніх частин відсіку або надбудови автомобіля.

Показана доцільність використання під час визначення нормативних оцінок середньозважених оцінок відповідних часток (частот) всіх можливих результатів, які попадають в інтервали часу оперативного розгортання пожежно-рятувального автомобіля в захисному спорядженні із засобами бронезахисту, що відповідають обраним критеріям визначення рівня підготовленості оперативного розрахунку. Рекомендується очікувані значення ймовірності попадання часу оперативного розгортання в обраний інтервал розглядати у вигляді середньовиваженої оцінки за відповідними індивідуальними оцінками всіх залучених експертів.

Отримано конкретні нормативи для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежних автомобілів середнього класу в захисному спорядженні із засобами бронезахисту взимку з урахуванням вимог кратності та запам'ятовування. Для першого варіанту (подача двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два рукави з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант): «відмінно» – швидше 120 с; «добре» – повільніше 120 с, але швидше 130 с; «задовільно» – повільніше 130 с, але швидше 140 с; «незадовільно» – повільніше 140 с. Для другого варіанту (подача переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант): «відмінно» – швидше 110 с; «добре» – повільніше 110 с, але швидше 120 с; «задовільно» – повільніше 120 с, але швидше 130 с; «незадовільно» – повільніше 130 с.

Сильною стороною отриманих результатів є їх достовірне (з рівнем значимості α=0,05) визначення. Слабою – трудомісткість проведення експериментальних досліджень для отримання результатів, а також необхідність підтвердження ефективності підготовки оперативних розрахунків пожежно-рятувальних автомобілів з використанням запропонованих нормативів.

8. Висновки

1. Розроблено науково-методичний апарат обґрунтування нормативів для оцінювання рівня підготовленості пожежних-рятувальників до оперативного розгортання пожежних автомобілів в захисному спорядженні із засобами бронезахисту, основу якого складає визначення зворотної функції стандартного нормального розподілу з урахуванням як його параметрів (математичного очікування та середньоквадратичного відхилення часу здійснення відповідного оперативного розгортання), так і оцінок ймовірності отримання відповідних оцінок у вигляді середньозважених оцінок відповідних часток (частот) всіх можливих результатів, які попадають в інтервали між (до, після) шуканими нормативними оцінками.

2. За результатами застосування статистичного підходу до аналізу дійсних експериментальних результатів виконання вправи рятувальниками ДСНС та урахування точки зору експертів стосовно кожного нормативу щодо відповідних часток (частот) всіх можливих результат у вигляді середньозважених оцінок отримано нормативні оцінки ($t_5(OP1) = 120$ с; $t_4(OP1) = 130$ с; $t_3(OP1) = 140$ с) для оцінювання рівня підготовленості до подачі двох пожежних стволів з прокладанням магістральної лінії d=77 мм на три рукава та двох робочих ліній d=51 мм на два ру-

кави з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант, а також нормативні оцінки ($t_5(OP2) = 110$ с; $t_4(OP2) = 120$ с; $t_3(OP2) = 130$ с) для оцінювання рівня підготовленості до подачі переносного лафетного ствола з прокладанням двох магістральних ліній на три рукава d=77 мм з установкою пожежно-рятувального автомобіля на пожежний гідрант.

Література

1. Наказ МВС України від 12.06.2023 № 480 «Про затвердження змін до Порядку організації службової підготовки осіб рядового і начальницького складу служби цивільного захисту».

2. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. URL: https://dsns.gov.ua

3. ДСТУ 8782:2018 Засоби індивідуального захисту. Бронежилети. Класифікація. Загальні технічні умови. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0216774-18#Text

4. Hazardous waste operations and emergency response. Occupational Safety and Health Standards 1910. 120. URL: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9765

5. NFPA 1500 Standard on Fire Department Occupational Safety and Health Program. 2002 Edition. URL: http://www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf

6. Tochihara Y., Lee J. Y., Son S. Y. A review of test methods for evaluating mobility of firefighters wearing personal protective equipment. Ind Health. 2022. 60(2). P. 106–120. doi: 10.2486/indhealth.2021-0157

7. OSHA 1910.156 Fire brigades. URL: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9810

8. NFPA 1033: Standard for Professional Qualifications for Fire Investigator. URL: http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards?mode=code&code=1033

9. Texas City Refinery explosion. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Texas_City_Refinery_explosion

10. Multi-part Document BS EN 1846 – Firefighting and rescue service vehicles. doi: 10.3403/BSEN1846

11. Morris C., Chander H. The Impact of Firefighter Physical Fitness on Job Performance. A Review of the Factors That Influence Fire Suppression Safety and Success. Safety. 2018. Vol. 4(60). P. 4–11. doi: 10.3390/safety4040060

12. Skinner T., Kelly V., Boytar A., Peeters G., Rynne S. Aviation Rescue Firefighters physical fitness and predictors of task performance. J Sci Med Sport. 2020. Vol. 23(12). P. 1228–1233. doi: 10.1016/j.jsams.2020.05.013

13. Белюченко Д. Ю., Стрілець В. М. Багатофакторна оцінка ефективності оперативного розгортання пожежних автомобілів в умовах виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Комунальне господарство міст. 2018. № 156. С. 204–211. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-204-211

14. Stevenson R., Siddall A., Turner P., Bilzon J. Implementation of Physical Employment Standards for Physically Demanding Occupations. Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2020. Vol. 62(8). P. 647–653. doi: 10.1097/JOM.0000000000001921

15. Gumieniak R., Shaw J., Gledhill N., Jamnik V. Physical employment standard for Canadian wildland fire fighters; identifying and characterising critical initial attack

© Д. Ю. Белюченко, В. М. Стрілець, Т. О. Луценко, П. О. Корчагін та ін.

response tasks. Ergonomics. 2018. Vol. 61/10. P. 1299–1310. doi 10.1080/00140139.2018.1464211

16. Strelec V. M., Stecuk E. I., Shepelev I. V. A statistical method of substantiating standards for evaluating the level of preparedness of pyrotechnicians (on the example of wearing personal protective equipment of a sapper), Military and technical collection. doi: 10.33577/2312-4458.19.2018.85-93

17. Стрелец В. М. Оценка эффективности подготовки спасателей к ликвидации чрезвычайных ситуаций с использованием нормативов. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2014. Вип. № 20. С. 124–131. URL: https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol19/19.pdf

18. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Наука, 1962. 564 с.

19. Соловйов І. І., Стрілець В. М., Льовін Д. А. Багатофакторна модель підйому водолазом-сапером вибухонебезпечного предмету. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. Вип. № 2(34). С. 272–294. URL: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/34/20.pdf

20. Статистичне опрацювання даних. Категорії відхилення від нормального розподілу. ДСТУ ISO 5479:2009 (ISO 5479:1997, IDT), 34 с.

***D. Beliuchenko*[1]**, *PhD, Lecturer of the Department*
***V. Strelets*[1]**, *DSc, Professor, Senior Researcher*
***T. Lutsenko*[1]**, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
***P. Korchahin*[2]**, *Head of the State Emergency Service of Ukraine*
***I. Malovyk*[3]**, *Chief Inspector of the State Emergency Service of Ukraine*
***O. Rebrov*[4]**, *Head of the detachment of the State Emergency Service of Ukraine*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*State Emergency Service of Ukraine in Lugansk region*
[3]*Department for the Prevention of Emergency Situations of the State Emergency Service of Ukraine*
[4]*State Emergency Service of Ukraine in Rivne region*

JUSTIFICATION OF STANDARDS FOR EVALUATING OPERATIONAL PERFORMANCE IN ARMOR PROTECTION MEANS

A scientific and methodological apparatus has been developed to substantiate standards for assessing the level of preparedness of fire-rescuers for the rapid deployment of fire-rescue vehicles in protective equipment with armor protection equipment, and standard assessments for standard options have been determined. For this purpose, the existing statistical method for substantiating the standards was improved by determining the weighted average estimates of the probabilities of the time of operational deployment in armor protection equipment falling within the intervals between the standards. This made it possible to take into account the diversity of expert opinions on this matter, which had not previously been taken into account. It has been established that in order to substantiate the required normative estimates, it is necessary to determine the inverse function of the standard normal distribution, taking into account its parameters (mathematical expectation and standard deviation of the time of implementation of the corresponding operational deployment), and estimates of the probability of obtaining the corresponding estimates in the form of weighted average estimates of the corresponding shares (frequencies) of all. possible results that fall within the intervals between (before, after) the required normative estimates. In accordance with the developed method, standards have been substantiated for assessing the level of preparedness of fire-rescuers to supply two fire trunks with the laying of a main line d=77 mm on three hoses and two working lines d=51 mm on two hoses with the installation of a fire-rescue vehicle on a fire hydrant , as well as to assess the level of preparedness for supplying a portable fire monitor with the laying of two main lines into three hoses d=77 mm with the installation of a fire and rescue vehicle on a fire hydrant. Their implementation will help eliminate the contradiction between the conditions for the use of fire and rescue vehicles, for which existing standards were developed, and modern conditions, when it is necessary to work in conditions of possible combat defeat.

Keywords: standard, operational deployment, fire and rescue vehicle, armor protection

References

1. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 12.06.2023 № 480. «On the approval of the Amendments to the Procedure for the Organization of Service Training of Private and Executive Staff of the Civil Defense Service».

2. State Service of Ukraine for Emergency Situations. Available at: https://dsns.gov.ua

3. DSTU 8782:2018 Personal protective equipment. Body armor. Classification. General technical conditions. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0216774-18#Text5

4. Hazardous waste operations and emergency response. Occupational Safety and Health Standards 1910.120. Available at: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9765

5. NFPA 1500 Standard on Fire Department Occupational Safety and Health Program. Edition. (2002). Available at: http://www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf

6. Tochihara, Y., Lee, J. Y., Son, S. Y. (2022). A review of test methods for evaluating mobility of firefighters wearing personal protective equipment. Ind Health, 60(2), 106–120. doi: 10.2486/indhealth.2021-0157. Available at: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8980691

7. OSHA 1910.156. Fire brigades. Available at: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9810

8. NFPA 1033: Standard for Professional Qualifications for Fire Investigator. Available at: http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards?mode=code&code=1033

9. Texas City Refinery explosion. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Texas_City_Refinery_explosion

10. Multi-part Document BS EN 1846. Firefighting and rescue service vehicles. doi: 10.3403/BSEN1846

11. Morris, C., Chander, H. (2018). The Impact of Firefighter Physical Fitness on Job Performance. A Review of the Factors That Influence Fire Suppression Safety and Success, Safety, 4(60), 4–11. doi: 10.3390/safety4040060

12. Skinner, T., Kelly, V., Boytar, A., Peeters, G., Rynne, S. (2020). Aviation Rescue Firefighters physical fitness and predictors of task performance, J Sci Med Sport, 23(12), 1228–1233. doi: 10.1016/j.jsams.2020.05.013.

13. Belyuchenko, D., Strelets, V., (2020). Multivariate as sessment of the effectiveness of the operational development of fire trucks in the face of industrial emergencies, Municipal Economy of Cities, Series: Engineering science and architecture, 3, 156, 204–211. doi: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-204-211

14. Stevenson, R., Siddall, A., Turner, P., Bilzon, J. (2020). Implementation of Physical Employment Standards for Physically Demanding Occupations, Journal of Occupational and Environmental Medicine, 62(8), 647–653. doi: 10.1097/JOM.0000000000001921

15. Gumieniak, R., Shaw, J., Gledhill, N., Jamnik, V. (2018). Physical employment standard for Canadian wildland fire fighters; identifying and characterising critical initial attack response tasks, Ergonomics, 61(10), 1299–1310. doi: 10.1080/00140139.2018.1464211

16. Strelec, V. M., Stecuk, E. I., Shepelev, I. V. (2018). A statistical method of

substantiating standards for evaluating the level of preparedness of pyrotechnicians (on the example of wearing personal protective equipment of a sapper), Military and technical collection, 19, 85–93. doi: 10.33577/2312-4458.19.2018.85-93

17. Strelets, V. M. (2014). Evaluation of the effectiveness of training of rescuers for the elimination of emergency situations with the use of standards. Problems of emergency situations, 20, 124–131. Available at: https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol19/19.pdf

18. Wentzel, E. S. (1962). The theory of probabilities. Science, 564.

19. Solovyov, I. I., Sagittarius, V. M., Levin, D. A. (2021). A multifactorial model of lifting an explosive object by a diver-sapper, Problems of emergency situations, 2(34), 272–294. Available at: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/34/20.pdf

20. Statistical data processing. (2009). Categories of deviation from the normal distribution, DSTU ISO 5479:2009, 34.

Надійшла до редколегії: 05.03.2024
Прийнята до друку: 13.04.2024

УДК 614.84

В. С. Макаренко, *ад'юнкт (ORCID 0000-0001-5629-1159)*
О. О. Кірєєв, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-8819-3999)*
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. О. Ковальов, *к.т.н, доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4974-5201)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ВОГНЕГАСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕГКИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ПОЖЕЖ КЛАСУ «В»

Визначено масові витрати компонентів вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів. На основі раніш проведених досліджень в якості легкого сипкого матеріалу, що забезпечує плавучість всієї системи, було обрано подрібнене піноскло з розміром гранул 1–1,5 см. В якості сипкого матеріалу, що підвищує ізолюючі властивості вогнегасної системи, застосовано спучений перліт з розміром гранул 1,0–1,4 мм. Для подавання гранульованого спученого перліту розроблено та виготовлено пневмоежекційний прилад. Проведено дослідження з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» з додатковим подаванням на поверхню бінарного шару піноскло + перліт розпиленої води. Встановлено, що подавання води дозволяє зменшити витрати спученого перліту в два рази. Показано, що змочування шару перліту водою суттєво підвищує ізолюючі властивості такого шару і надає високу охолоджуючу здатність всієї вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів. На основі економічних розрахунків показано, що застосування води для змочування верхнього шару обумовлює можливість зменшити фінансові витрати потрібні на вогнегасні речовини. Встановлено, що фінансові витрати на вогнегасні речовини системи подрібнене піноскло + спучений перліт + розпилена вода з питомими поверхневими витратами компонентів 10,5 кг/м^2 1,98 кг/м^2 і 2 кг/м^2 складають 184 грн/м^2. За цим параметром ця вогнегасна система має суттєву перевагу по зрівнянню з системами піноскло+гель і повітряно механічними пінами. Проведено порівняння з результатами гасіння бензину на модельних вогнищах пожежі малих розмірів. На основі проведення екологічної оцінки запропонованої вогнегасної системи показано її переваги за цим параметром по зрівнянню з існуючими засобами гасіння легкозаймистих рідин. Розглянуто питання впровадження запропонованої вогнегасної системи в практику пожежогасіння резервуарів великих розмірів з легкозаймистими рідинами.

Ключові слова: легкозаймисті рідини, бензин, вогнегасні властивості, спучений перліт, піноскло, розпилена вода

1. Вступ

Світовий дослід вказує на суттєві трудності при гасінні пожеж в резервуарах великих розмірів з легкозаймистими рідинами (ЛЗР) [1]. Гасіння таких резервуарів потребує залучення великих сил та засобів [2]. Крім того, гасіння таких пожеж вимагає витрату великого часу [3]. Нормативні документи різних країн світу пропонують в якості основного засобу гасіння ЛЗР використовувати різні види пін [4]. Однак вогнегасні піни мають ряд недоліків [5]. Одним з основних недоліків вогнегасних пін є їх самовільне руйнування та руйнування під дією теплового випромінювання полум'я. Останній вид руйнування особливо проявляється при гасінні резервуарів великих розмірів з ЛЗР [6].

Ще одним з недоліків багатьох видів пін є швидке їх руйнування в разі контакту з полярними рідинами. Це викликало потребу розробки пін спеціального призначення. Але такі піни малоефективні в разі їх використання для гасіння неполярних рідин. Це знижує універсальність пінних засобів пожежогасіння [7]. Також можна відмітити невисокі екологічні і економічні характеристики вогнегасних пін [8]. Таким чином можна констатувати актуальність потреби в розробці нових засобів гасіння пожеж за участю ЛЗР.

© В. С. Макаренко, О. О. Кірєєв, М. А. Чиркіна-Харламова та ін.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Розробка нових засобів гасіння горючих рідин ведеться в різних напрямках [9]. Більша частина таких досліджень ведеться в напрямку розробки засобів гасіння [10] в яких використовується в якості домінуючого механізму припинення горіння – ізоляція поверхні рідини від зони горіння [11]. Інша частина досліджень базується на використанні таких механізмів припинення горіння як розведення пари горючих рідин [12], охолодження рідини або зони горіння [13], інгібування окисно – відновних реакцій в зоні полум'я [14] та зриву полум'я [15]. Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновок про більшу перспективність розробки нових засобів гасіння рідин в яких в якості домінуючого механізму припинення горіння реалізується ізолюючий механізм.

Ізолюючий механізм гасіння в повної мірі може реалізується в пінах швидкого тверднення (ПШТ) [16]. Так в роботі [17] експериментально встановлено високі ізолюючі властивості таких пін. Вони мають перевагу по зрівнянню зі повітряно-механічними і компресійними пінами завдяки набагато більшій стійкості та можливості використовувати їх як для ізоляції поверхонь полярних так і неполярних рідин. Однак в цих роботах ПШТ запропоновано використовувати не для гасіння рідин, а для локалізації розливів токсичних та горючих рідин. В роботі [18] зроблено висновок про можливість використовувати ПШТ для гасіння як полярних так неполярних рідин. Дані наведені в цій роботі дозволяють зробити висновок про набагато більшу термічну стійкість ПШТ по зрівнянню с повітряно-механічними пінами.

Однак у ПШТ маються недоліки. Для утворення таких пін є потреба у використанні екологічно небезпечних піноутворювачів та компонентів гелеутворюючих систем. Крім того процес одержання ПШТ більш складний ніж процес генерування повітряно-механічних пін. Він потребує попереднього змішування двох окремих багатокомпонентних рідин з наступним спінюванням розчину, що утворився. Причому додаткові складності викликає потреба в приготуванні розчинів з точно визначеними концентраціями.

Суттєво інший підхід було запропоновано в роботі [19]. В цій роботі вогнегасно-ізолюючий шар на поверхні рідини формується за участю легких сипких матеріалів. Нижній шар створюється шляхом подавання на поверхню рідини гранульованого або подрібненого піноскла (ПС). Цей шар забезпечує плавучість всієї вогнегасної системи. Другий шар гелю формується на поверхні першого шару шляхом роздільно – одночасного подавання компонентів гелеутворюючої системи. Цей шар забезпечує високі ізолюючі властивості всієї вогнегасної системи. Вогнегасна система ПС+гель показала високі вогнегасні властивості під час гасіння як полярних так і неполярних ЛЗР. Суттєвою позитивною особливістю такої вогнегасної системи є велика стійкість вогнегасно – ізолюючого гелевого шару, як за звичайних умов, так і в разі інтенсивного теплового впливу на неї.

В роботі [19] встановлено, що у випадку гасіння висококиплячих горючих рідин (ГР) достатньо використання ПС без шару гелю. Висока ефективність ПС або змоченого водою ПС під час гасіння ГР дозволяє зробити висновок, що на теперішній час ця вогнегасна система є найбільш прийнятною для гасіння висококиплячих рідин. В разі гасіння ЛЗР вогнегасна система ПС+гель є більш ефективною по зрівнянню з пінними засобами пожежогасіння. Але у цій системі є ряд недоліків. Одним з недоліків такої системи є складний процес формування гелевого шару. Він потребує використання двох окремих засобів подавання розчинів геле-

утворюючої системи. Причому концентрації компонентів в цих розчинах повинні бути точно визначеними. Крім того, під час подавання компонентів гелеутворюючої системи тільки мала частина гелю утворюється в порожнинах між гранулами ПС. Більша частина гелю утворюється на верхній поверхні зовнішнього шару ПС, що не приводе до збільшення ізолюючих властивостей вогнегасної системи. Це, в свою чергу, обумовлює збільшення маси шару гелю.

Для подолання останнього недоліку в роботі [20] запропоновано замість гелю на поверхню ПС подавати легкий сипкий матеріал – спучений гранульований перліт [21] з меншим розміром гранул ніж ПС [22]. В такому випадку більша частина гранул перліту потрапляє в порожнини між гранулами ПС [23], що приводе до збільшення ізолюючих властивостей [21]. Перевага перліту по зрівнянню з гелем також обумовлена суттєво меншою густиною перліту. Це приводе до зменшення маси верхнього ізолюючого шару і відповідно до меншої маси шару ПС, який забезпечує плавучість всієї вогнегасної системи.

В роботах [21] та [23] було експериментально визначено вогнегасні властивості системи ПС+перліт і ПС+перліт+вода на лабораторних модельних вогнищах пожежі класу «В» та стандартних модельних вогнищах пожежі «2В». В цих роботах були встановлені оптимальні масові витрати ПС, перліту і води на гасіння малих за розміром вогнищ пожеж з ЛЗР – бензином. Але для наближення інтенсивності горіння та умов гасіння до реальних пожеж потребує проведення відповідних досліджень для стандартних модельних вогнищ пожежі більших розмірів, ніж раніш було використано.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність даних щодо вогнегасних характеристик систем на основі сипких матеріалів з використанням стандартних модельних вогнищ пожежі класу «В» більших за розміром ніж вогнище «2В».

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення вогнегасних характеристик систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Розробити методику визначення вогнегасних характеристик систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

2. Сконструювати і виготовити пристрій для подавання гранульованого перліту.

3. Експериментально визначити вогнегасні властивості систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В».

4. Провести порівняння за параметром ефект – вартість запропонованої вогнегасної системи з існуючими.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес гасіння легкозаймистих рідин з використанням легких сипких матеріалів.

Предметом дослідження є експериментальне визначення масових витрат матеріалів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода на гасіння стандартного вогнища пожежі «8В» з бензином.

© В. С. Макаренко, О. О. Кірєєв, М. А. Чиркіна-Харламова та ін.

Методи дослідження:

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

– для визначення витрат вогнегасних речовин використовувались вагові і об'ємні методи;

– при визначенні гранулометричного складу сипких матеріалів застосовано ситовий аналіз;

– для оцінки фінансових витрат використані елементи економічного аналізу.

Відомо, що при гасінні ЛЗР пінами витрати останніх в разі великих за розміром вогнищах помітно більші ніж на вогнищах малих розмірів. Це пояснюється тим, що час гасіння для великих за розміром вогнищ більший ніж в разі гасіння малих вогнищ. Це приводе до великого часу впливу теплового випромінювання на нанесений шар піни. Це в свою чергу викликає руйнування частини пінного шару. В разі використання в якості вогнегасних речовин сипких матеріалів не відбувається руйнування вогнегасного шару [23]. Це приводе до меншого впливу розміру модельного вогнища пожежі на питомі витрати вогнегасних речовин в порівнянні з гасінням пінами.

Але в разі гасіння більших за розміром модельних вогнищ потребує використання інших засобів подачі компонентів вогнегасних систем на основі сипких матеріалів. На відміну від засипання сипких матеріалів в малі за розміром ємності подавання за допомогою механізованих пристроїв не дозволяє забезпечити формування рівномірного по висоті шару сипких матеріалів. Ця проблема ускладняється також завдяки неможливості візуального контролю за рівномірністю висоти шару сипкого матеріалу в рідині. Останній факт пояснюється повною непрозорістю факелу полум'я і неможливістю суттєвого наближення оператора гасіння до стандартного модельного вогнища пожежі «8В» [19]. Це приводе до можливості суттєвої різниці між питомими масовими витратами вогнегасних речовин під час гасіння стандартних модельних вогнищ «2В» і «8В».

Таким чином, гіпотезою дослідження є більші питомі масові витрати компонентів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода під час гасіння модельного вогнища «8В» в порівнянні з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В».

5. Розробка методики визначення вогнегасних характеристик сипких матеріалів

Методика дослідження базується на основі раніш отриманих результатів з гасіння модельних вогнищ пожежі класу «В» малих розмірів. Реальні пожежі можуть суттєво відрізнятися за інтенсивністю горіння від горіння ГР в деко модельного вогнища пожежі.

В першу чергу різниця в умовах горіння полягає в більшій площі поверхні рідини, що горить, в стандартному модельному вогнищі пожежі «8В» по зрівнянню з вогнищем «2В». Крім того, на інтенсивність горіння сильно впливає висота вільного борту ємності в якій находиться рідина. Найбільша інтенсивність горіння спостерігається за малих висот вільного борту. В стандартних модельних вогнищах пожежі класу «В» висота вільного борта обирається з міркувань мінімально потрібної для забезпечення такої висоти шару піни, щоб вона не виходила за межі верхнього борта дека.

Вважається, що основним параметром модельного вогнища пожежі класу «В», що визначає масову швидкість вигоряння рідини є відношення площі поверхні рідини до периметру ємності з рідиною. Для деко циліндричної форми це відношення дорівнює D/4, де D – діаметр деко. В попередніх роботах, де використовувалися лабораторні модельні вогнища і стандартне модельне вогнище «2В» це відношення змінювалися в межах 2,8 до 7,2 см. В цих межах співвідношення масових швидкостей вигоряння помітно змінюється. Починаючи зі значення D/4=15 зміна масової швидкості вигоряння зі зростанням розміру модельного вогнища становиться не суттєвою. Таке відношення відповідає діаметру вогнища пожежі 60 см, або стандартному модельному вогнищу «8В». Таким чином в цій роботі для визначення вогнегасних властивостей системи на основі легких сипких матеріалів обирається стандартне модельне вогнище пожежі «8В». Саме таке вогнище було обрано в роботі [19]. Це дозволить коректне порівняти результати для обраної вогнегасної системи з відповідними даними для системи ПС + гель.

Основні параметри стандартного модельного вогнища пожежі «8В» наведено нижче:

- діаметр – 60 см,
- вільна площа поверхні рідини – 0,28 м^2,
- висоту борту 20 см,
- об’єм води 16 л,
- об’єм бензину АІ-92 – 8 л.

В якості сипких матеріалів, як і у попередніх роботах [20–23] обрано ПС і спучений гранульований перліт, характеристики яких наведено в табл. 1.

Табл. 1. Характеристики сипких матеріалів: насипна щільність (ρ) плавучість в бензині (Пл), розмір гранул (*l*) і частка сипкого матеріалу, що просипається крізь шар ніжній шар піноскла (прос)

Характеристика сипкого матеріалу	Сипкий матеріал	
	Подрібнене піноскло	Спучений перліт
ρ, кг/м^3	99	165
Пл	0,51	0,24
l, мм	10–15	1,0±1,4
прос, (%)	0	≤3

Для визначення гранулометричного складу сипких матеріалів застосовано ситовий аналіз.

5.1. Розробка пристрою для подавання гранульованого перліту

Подавання сипких вогнегасних речовин на поверхню рідини потребує розробки відповідних засобів. Для подавання гранульованого ПС було використано повітряний ежекційний апарат, який був запропоновано в роботі [19]. Попередні досліди показали, що цей апарат не забезпечує прийнятні умови подавання дрібного спученого перліту. В першу чергу це обумовлено на порядок меншими розмірами гранул перліту по зрівнянню з гранулами ПС. На основі аналізу ежекційних пристроїв, що знаходяться в продажі було обрано розпилювач в’язких композицій РТ-0402. Цей розпилювач було модифіковано шляхом збільшення діаметру вихідного отвору до 8 мм. Для забезпечення подавання стислого повітря використовувався компресор Güde 231/8/24.

В попередніх дослідах було обрано діаметр вихідного отвору розпилювача і

© В. С. Макаренко, О. О. Кірєєв, М. А. Чиркіна-Харламова та ін.

потрібний тиск повітря для розпилювання перліту. Відповідні характеристики апарату для подавання перліту склали з відстані 2 м:

– максимальна дальність подавання 5 м;
– розсіювання уздовж осі ствола – 0,4 м;
– розсіювання у боки – 0,3 м;
– витрати перліту 4,5 дм^3/хв.

5.2. Розробка методики визначення вогнегасних характеристик

Для можливості проведення порівняльного аналізу умови проведення експерименту були наближені до таких, що використовувались в роботах [19, 22, 23]. Різниця складалась в розмірах дека і способі подавання перліту. При цьому кількість компонентів вогнегасної системи було збільшено відповідно до збільшення площі поверхні рідини. Крім того, в зв'язку з труднощами візуального контролю рівномірності нанесення шару ПС під час використання стандартного модельного вогнища пожежі «8В» було прийнято коефіцієнт запасу для кількості поданого ПС рівним 1,5 (+50 %). Розрахунки показали, що об'єм ПС повинен складати 30 л.

Після формування шару ПС на поверхні бензину здійснювалось подавання перліту до моменту, коли локальна висота полум'я не перевищувала 10 см. Далі проводилось подавання води до моменту припинення горіння. Після цього подавалась такий самий час додаткова кількість води. Тобто загальна кількість води, що подана була в два рази більше ніж кількість води витраченої на момент припинення горіння. Така технологія гасіння була обґрунтована в роботах [22, 23].

Таким чином послідовність дій була наступною. Деко стандартного модельного вогнища пожежі класу «8В» встановлювалось на горизонтальну поверхню. В нього заливалось 16 л води і 8 л бензину АІ-92. Далі бензин підпалювався. Після однієї хвилини вільного горіння візуально фіксувалась висота полум'я. Потім в деко за допомогою пневмо-ежекційного приладу рівномірно по поверхні подавалось 30 дм^3 ПС. На далі за допомогою розробленого ежекційного апарату на поверхню ПС рівномірно подавався перліт до моменту коли висота полум'я не перевищувала 10 см. Маса витраченого перліту розраховувалась ваговим методом з урахуванням частини перліту що не потрапила в модельне вогнище.

В разі подавання води вона рівномірно розпилювалась на поверхню бінарного шару ПС + перліт за допомогою побутових розпилювачів ОЗ-2 до повного загасання полум'я. Час подавання води фіксувався. З урахуванням результатів робіт [22, 23] додатково подавалась вода ще такий самий час. Маса води визначалась ваговим методом. Після цього через 5 хвилин проводилось випробування на повторне займання під дією палаючого факелу.

В разі досліду з гасінням без участі води з урахуванням результатів робіт [21] та [23] кількість поданого перліту було обрано в два рази більшою ніж потрібно для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» з участю води. Через 5 хвилин після погасання полум'я проводився дослід з визначення можливості повторного займання.

5.3. Експериментальне визначення витрат вогнегасних речовин на гасіння

Експеримент проводився за вище наведеною методикою. На рис. 1а–1з представлені етапи гасіння модельного вогнища пожежі «8В» в варіанті з подаванням води. Експерименти було проведено за температури 12–13 ºС та швидкос-

ті вітру 1–2 м/с. Об'єми ПС і перліту відміряли за допомогою мірних стаканів. Маса води визначалась шляхом зважування оприскувача на початку і в кінці експерименту. Через 5 хвилин після гасіння вогнища пожежі проводився експеримент на визначення можливості повторного займання. У всіх випадках займання не відбувалось.

Відповідні чисельні результати експерименту представлено в табл. 2. Данні з висоти шарів вогнегасних речовин приведені для випадку коли вони рівномірно подаються на рівну горизонтальну поверхню.

Табл. 2. Питомі поверхневі витрати (Ф) і висоти шарів (Н) компонентів вогнегасної системи потрібних для гасіння модельного вогнища пожежі «8В»

Вид системи	Піноскло		Перліт		Вода		Загальна маса
	Ф, кг/м^2	Н, см	Ф, кг/м^2	Н, см	Ф, кг/м^2	Н, см	Ф, кг/м^2
8 «В»							
З участю води	10,5	10,5	1,98	1,2	2,0	0,2	14,48
Без участі води	10,5	10,5	3,63	2,2	-	-	14,13
2 «В»							
З участю води	6,7	7	1,6	1,0	2,0	0,2	10,3

Результати візуальних спостережень вказують, що через 1 хвилину після підпалювання бензину висота полум'я досягає 1,5–2 м. При цьому не можливо побачити поверхню бензину, що горить. Подавання ПС на поверхню бензину спочатку підвищує інтенсивність горіння. Після подавання 30 л ПС висота полум'я поступово зменшується до 30–35 см. Подальше подавання перліту зменшує висоту полум'я до 5–10 см. Причому горіння відбувається переважно вздовж борта дека. Подальше подавання води приводе до припинення горіння бензину. В разі поверхневої витрати води 2,0 кг/м^2 не відбувається повторне займання стандартного модельного вогнища пожежі в разі піднесення до поверхні змоченого перліту горящого факела.

В досліді без залучення води для гасіння бензину, горіння припиняться в разі нанесення на поверхню ПС шару перліту висотою 2,2 см. При цьому також не спостерігається повторного займання. Досліди з гасіння стандартних модельних вогнищ пожежі класу «8В» проводились по два рази, як у варіанті з застосуванням води, так і без її застосування.

6. Розрахунок фінансових витрат на вогнегасні речовини

Важливою характеристикою вогнегасного засобу є його економічні параметри. Розглянемо тільки одну складову економічного параметру вогнегасного засобу – вартість вогнегасних речовин. В роботі [23] було проведено короткий порівняльний економічний аналіз вогнегасних систем на основі легких сипких матеріалів і системи ПС+гель. Для розрахунків фінансових витрат було використані дані, які отримані з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «2В». Нижче приведемо результати, що базуються на дослідженнях з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В». Останні дані найбільш наближені до реальних умов гасіння великих за розміром резервуарів з ЛЗР. Під час розрахунків було використано такі самі цінові параметри речовин як у роботі [23]. Також, як у цій роботі витрати на воду не було враховано.

© В. С. Макаренко, О. О. Кірєєв, М. А. Чиркіна-Харламова та ін.

а)

б)

в)

г)

д)

е)

ж)

Рис. 1. Етапи гасіння модельного вогнища пожежі «8В»: а – основне обладнання, яке використовувалось для гасіння; б – горіння через 1 хвилину після запалювання бензину; в – зменшення висоти полум'я під час подавання ПС; г – подавання перліту; д – горіння після нанесення перліту з товщиною шару 1 см; е – припинення горіння після подавання води; ж – дослід на повторне займання

Вихідні данні для розрахунку. Вартість 1 кг матеріалу: гранульований спучений перліт – $С_{перл}$=20,7 грн/кг; ПС (скляна пінокрихта) – $С_{пс}$=13,7 грн/кг. Питомі витрати ПС $Ф_{пс}$=10,5 кг/м^2, перліту в разі додаткового використання води $Ф_{перл}$=1,98 кг/м^2, перліту за умови відсутності використання води $Ф_{перл}$=3,63 кг/м^2.

Фінансові витрати вогнегасного засобу в розрахунку на 1 м^2 поверхні гасіння, (С), розраховувалось за співвідношенням:

$$С = С_{пс} \cdot Ф_{пс} + С_{перл} \cdot Ф_{перл}. \quad (1)$$

В табл. 3 представлені результати проведених фінансових розрахунків разом з відповідними результатами для повітряно-механічної піни (ПУ – софір) і системи ПС + гель.

Табл. 3. Фінансові витрати на гасіння 1 м^2 площі горіння бензину для різних вогнегасних систем

Система	ПС +перліт+вода	ПС +перліт	ПС +гель	ПВМ (Софір)
Фінансові витрати, грн/м^2	184	219	250	~1000
Відношення фінансових витрат	1	1,2	1,4	5,4

7. Обговорення результатів дослідження гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В»

Візуальне спостереження гасіння модельного вогнища пожежі «8В» вказує на те, що пневматичне подавання перліту забезпечує заповнення порожнин між гранулами ПС. Тільки невелика частина гранул перліту утримується на верхній поверхні гранул ПС. Це суттєво відрізняється від випадку гасіння з використанням гелеутворюючих систем [19]. В останньому випадку більша частина гелю утворюються на верхній поверхні гранул ПС. Це в свою чергу не збільшує ізолюючих властивостей системи ПС+гель, а приводе до збільшення масових витрат компонентів вогнегасної системи. Порівняння чисельних результатів, що наведено в роботі [19] і одержаних для систем ПС+перліт і ПС+перліт+вода вказує на суттєву перевагу в масових витратах компонентів вогнегасних систем ПС+перліт+вода і ПС+перліт по зрівнянню з системою ПС+гель (табл. 3).

Результати проведених досліджень з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» також підтверджують висновки наведені в роботі [23], що змочування шару перліту водою забезпечує покращення ізолюючих властивостей сухого перліту. Крім цього, вода збільшує охолоджуючий ефект шару перліту. Одночасно можна відмітити, що для гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» потребуються більші питомі поверхневі витрати перліту та ПС по зрівнянню з гасінням меншого за розміром вогнища пожежі «2В». Це обумовлено помітно більшою інтенсивністю горіння в більшому за розміром вогнищі пожежі «8В». Останнє приводе до більшого нагріву поверхневого шару бензину і стінок дека. Це підтверджує факт більш інтенсивного горіння поблизу стінок дека після нанесення шару перліту висотою 1 см (рис. 1, д) і швидкого загасання полум’я після подавання води в цю область (рис. 1, е).

Ще однією особливістю гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В» по зрівнянню з гасінням менших за розміром вогнищ є складність забезпечити рівномірний за висотою шар ПС на поверхні бензину. Це обумовлено неможли-

© В. С. Макаренко, О. О. Кірєєв, М. А. Чиркіна-Харламова та ін.

вістю візуального контролю за рівномірністю висоти шару ПС, завдяки непрозорістю факелу полум'я. Тільки після подавання ПС з поверхневою витратою 8–9 кг/м^2 виявляються ділянки ПС з меншою висотою шару. В подальшому ПС подається на саме на ці ділянки. Але завдяки розсіюванню гранул ПС при подаванні за допомогою повітряного ежекційного апарату частина ПС потрапляє на ділянки з вже досягнутою вогнегасною висотою шару ПС. Це в свою чергу приводе до збільшення витрат ПС по зрівнянню з вогнищами пожежі менших розмірів.

Порівняння витрат вогнегасних речовин двох систем ПС+перліт+вода та ПС+перліт вказує на майже однакову масову витрату компонентів двох систем, що досліджено (табл. 2). Але перша система має перевагу у плані фінансових витрат (табл. 3). Одночасно можна відмітити, що вогнегасна система ПС+перліт має перевагу в тому, що в ній достатньо використовувати два засоби подавання компонентів, а система ПС+перліт+вода вимагає додаткового застосування засобу подавання розпиленої води. Порівняння отриманих результатів з відповідними даними для модельного вогнища пожежі «2В» (табл. 2) вказує на більші питомі масові витрати компонентів вогнегасної системи піноскло + перліт + вода під час гасіння модельного вогнища «8В» по зрівнянню з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В» на 40 %.

Порівняння економічних параметрів чотирьох, розглянутих вогнегасних засобів гасіння пожеж класу «В» дозволяє констатувати, що всі три вогнегасні системи на основі ПС мають перевагу по зрівнянню з ПВМ в 4–5,4 рази. Це обумовлено в основному двома факторами – високою вартістю піноутворювачів і низькою стійкістю пін. Руйнування пін потребує додаткового подавання піни замість тієї піни, що зруйнувалась. Вогнегасні системи ПС+перліт+вода та ПС+перліт також мають додаткову перевагу в економічному плані по зрівнянню з іншими в можливості повторного використання сипких матеріалів після простої процедури їх відновлення. Одночасно з цим, їх використання під час гасіння не приводе до забруднення цих рідин. Ще однією перевагою систем ПС+перліт+вода та ПС+перліт є прості умови та необмежений час їх зберігання.

Крім того, вогнегасні системи ПС+перліт+вода та ПС+перліт мають найбільш високі екологічні параметри. Вони не містять в своєму складі летучих, водорозчинених та поверхнево-активних речовин. ПС та перліт є інертними, термічно стійкими, малотоксичними речовинами (4 клас небезпеки).

Наступним етапом досліджень, що потрібно провести для впровадження запропонованої вогнегасної системи в практику є практичне гасіння повномасштабних реальних пожеж резервуарів з ЛЗР. Це, в свою чергу, потребує розробки відповідних засобів подавання вогнегасних речовин, які забезпечать високі витрати вогнегасних речовин. Для подальшого підвищення вогнегасних властивостей систем на основі легких сипких матеріалів доцільно провести окремі дослідження нових видів легких сипких матеріалів, які будуть спеціально призначені для цілей пожежогасіння рідин.

8. Висновки

1. Розроблено методику визначення вогнегасних властивостей систем піноскло+перліт і піноскло+перліт +вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В», яка полягає в подаванні за допомогою пневмоежекційного приладу подрібненого піноскла об'ємом 30 дм^3, з наступним подавання перліту за допомогою розробленого ежекційного апарату до моменту коли висота полум'я

знизиться до 10 см. Після чого за допомогою розпилювача на поверхню розпилюється вода до повного припинення горіння.

2. Шляхом модифікації промислового розпилювача в'язких консистенцій сконструювано та виготовлено пристрій для подавання гранульованого перліту на гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «8В», який дозволяє подавати перліт на відстань до 5 м.

3. Експериментально визначено вогнегасні властивості систем піноскло + перліт і піноскло+перліт+вода з використанням стандартного модельного вогнища пожежі «8В». В разі додаткового використання води з питомою витратою 2 кг/м^2 вогнегасні витрати піноскла становить 10,5 кг/м^2 з додатковим нанесенням перліту з питомою витратою 1,98 кг/м^2. Під час гасіння без участі води витрати піноскла і перліту становлять 10,5 кг/м^2 і 3,63 кг/м^2 відповідно.

4. Порівняння отриманих результатів з відповідними даними для модельного вогнища пожежі «2В» вказує на більші питомі масові витрати компонентів вогнегасної системи піноскло+перліт+вода під час гасіння модельного вогнища «8В» по зрівнянню з відповідними характеристиками отриманими для модельного вогнища «2В» на 40 %. Фінансові витрати на вогнегасні речовини для систем піноскло+перліт+вода, піноскло+перліт, піноскло+гель і повітряно-механічну піну становлять 184 грн/м^2, 219 грн/м^2, 250 грн/м^2 і 1000 грн/м^2 відповідно.

Література

1. Campbell R. Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection association. 2014. URL: https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osflammableor Combustible Liquidtank Storage Facilities.ashx

2. 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

3. Lang X.-q., Liu Q.-z., Gong H. Study of Fire Fighting Systemto Extinguish Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks. Procedia Engineering. 2011. Vol. 11. P. 189–195. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/ pii/S1877705811008344

4. EN 1568-1:2018. Fireextinguishing media. Foam concentrates. Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids

5. EN 1568-2:2018. Fireextinguishing media. Foam concentrates. Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids

6. EN 1568-3:2018. Foam concentrates. Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for surface application to water-immiscible liquids /European standard

7. Olkowska E., Polkowska Z., Namieśnik J. Analytic sofsur factantsin the environment: problems and challenges. Chem. Rev. 2011. Vol. 111. № 9. P. 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

8. 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

9. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Numerical simulation of the creation of a fire-fighting barrier using an explosion of a combustible

charge. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6. № 10(90). P. 11–16. doi: 10.15587/1729-4061.2017.114504

10. Semko A., Beskrovnaya M., Vinogradov S., Hritsina I., Yagudina N. The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blowout. The International Journal of Multiphysics. 2015. Vol. 9. № 1. P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9

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

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

13. Chernukha A., Teslenko A., Kovaliov P., Bezuglov O. Mathematical modeling of fireproof efficiency of coatings based on silicate composition. Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. MSF. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.70

14. Vasilchenko A., Otrosh, Yu., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A. Feature of fire resistance calculation of steel structures with intumescent coating. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 230. № 02036. doi: 10.1051/matecconf/201823002036

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

16. 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

17. Kireev A., Kirichenko I., Petukhov R., Sharshanov A., Tarkho T. Modeling the insulation properties of multicomponent solid foam-like material based on gel-forming systems. Functional materials. 2021. Vol 28. № 3. P. 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

18. Мусаев М. Е., Дадашов И. Ф. Разработка единого средства для предотвращения испарения токсичных жидкостей и тушения пожаров класса «В». Академия МЧС Азербайджанской Республики. 2021. Вып. 3–4. С. 117–124. URL: https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf

19. 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.

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

21. Макаренко В. С., Кірєєв О. О., Слепужніков Є.Д., Чиркіна М. А. Дослідження впливу порошків на вогнегасні характеристики бінарних шарів пористих матеріалів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. Вип. 1(35). С. 297–310. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

22. Makarenko V., Kireev A., Slepuzhnikov Y., Hovalenkov S. Properties of mul-

ti-component fire extinguishing systems based on light bulk materials. Key Engineering Materials. 2023. Vol. 954. P. 177–184. doi: 10.4028/p-6v6dmx

23. 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

V. Makarenko, *Adjunct*
A. Kireev, *DSc, Professor, Professor of the Department*
M. Chyrkina-Kharlamova, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
Y. Slepuzhnikov, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
O. Kovalov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FIRE-EXTINGUISHING CHARACTERISTICS OF LIGHT BULK MATERIALS FOR CLASS "B" FIRES

On the basis of earlier studies, crushed foam glass with a granule size of 1–1,5 cm was chosen as a light loose material that ensures the buoyancy of the entire system. As a loose material that increases the insulating properties of the fire extinguishing system, expanded perlite with a granule size of 1 was used 1–1,4 mm. A pneumatic ejection device was developed and manufactured for feeding granular expanded perlite. A study was also conducted on extinguishing a standard model fire «8B» with additional application of sprayed water to the surface of the binary layer of foam glass + perlite. It has been established that supplying water allows to reduce the consumption of swollen perlite by two times. It is shown that wetting a layer of perlite with water significantly increases the insulating properties of such a layer and provides a high cooling capacity of the entire fire extinguishing system based on light loose materials. On the basis of economic calculations, it is shown that the use of water for wetting the upper layer makes it possible to reduce the financial costs required for fire-extinguishing substances. It was established that the financial costs of fire-extinguishing substances of the system crushed foam glass + expanded perlite + sprayed water with specific surface consumption of the components 10,5 kg/m^2, 1,98 kg/m^2 and 2 kg/m^2 amount to 184 UAH/m^2. According to this parameter, this fire extinguishing system has a significant advantage compared to foam glass + gel systems and air-mechanical foams. A comparison was made with the results of extinguishing gasoline on model fires of small sizes. On the basis of the environmental assessment of the proposed fire extinguishing system, its advantages in terms of this parameter are shown in comparison with existing means of extinguishing flammable liquids. The issue of introducing the proposed fire extinguishing system into the practice of fire extinguishing of large tanks with flammable liquids was considered.

Keywords: flammable liquids, gasoline, fire extinguishing properties, expanded perlite, foam glass, sprayed water

References

1. Campbell, R. (2014). Fires at Outside Storage Tanks. National fire protection association. Available at: https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/osflammableorCombustibleLiquidtankStorage Facilities.ashx

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

3. Lang, X.-q., Liu, Q.-z., Gong, H. (2011). Study of Fire Fighting System to Extinguish Full Surface Fire of Large Scale Floating Roof Tanks. Procedia Engineering, 11, 189–195. Available at: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811008344

4. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 1:

Specification for medium expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committeeforstandardization.

5. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 2: Specification for high expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committee for standardization.

6. Code, P. (2018). Fire extinguishing media. Foam concentrates – Part 3: Specification for low expansion foam concentrates for urface application to water-immiscible liquids. European committeeforstandardization.

7. Olkowska, E., Polkowska, Z., Namieśnik, J. (2011). Analytic sofsur factantsin the environment: problems and challenges. Chem. Rev, 111(9), 5667–5700. doi: 10.1021/cr100107g

8. 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

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

10. Semko, A., 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

11. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely dispersed water. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10(92)), 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

12. Vambol, S., Bogdanov, I., Vambol, V., Suchikova, Y., Kondratenko, O., Hurenko, O., Onishchenko, S. (2017). Research into regularities of pore formation on the surface of semiconductors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(5(87)), 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2017.104039

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

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

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

16. 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

17. Kireev, A., Kirichenko, I., Petukhov, R., Sharshanov, A., Tarkho, T. (2021). Modeling the insulation properties of multicomponent solid foam-like material based on gel-forming systems. Functional materials, 3(28), 549–555. doi: 10.15407/fm28.03.549

18. Musayev, M. Ye., Dadashov, I. F. (2021). Razrabotka yedinogo sredstva dlya

predotvrashcheniya ispareniya toksichnykh zhidkostey i tusheniya pozharov klassa «B». Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Azerbaijan Republic. Academy of the Ministry of Emergency Situations of the Azerbaijan Republic, (3–4), 117–124. Available at: https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf

19. Dadashov, I. F., Kiryeyev, O. O., Trehubov, D. H., Tarakhno, O. V. (2021). Hasinnya horyuchykh ridyn tverdymy porystymy materialamy ta heleutvoryuyuchymy systemamy. Kharkiv. NUCPU, 240 p.

20. Makarenko, V. S., Kiryeyev, O. O., Tregubov, D. G., Chyrkina, M. A. (2021). Doslidzhennya vohnehasnykh vlastyvostey binarnykh shariv lehkykh porystykh materialiv. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 1(33), 235–245. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-18

21. Makarenko, V., Kireev, O., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M. (2022). Doslidzhennya vplyvu poroshkiv na vohnehasni kharakterystyky binarnykh sharivporystykh materialiv. Problems of Emergency Situations, 1(35), 297–310. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-22

22. 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

23. Makarenko, V., Kireev, A., Chyrkina-Kharlamova, M., Minska, N., Sharshanov, A. Doslidzhennya hasinnya model′noho vohnyshcha pozhezhi klasu «B» sypkymy materialamy. Problems of Emergency Situations, 2(38), 281–296. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-19

Надійшла до редколегії: 08.03.2024
Прийнята до друку: 13.04.2024

УДК 519.6

О. Є. Басманов, *д.т.н., професор, головн.н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)*
М. В. Максименко, *ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1888-4815)*
В. В. Олійник, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5193-1775)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОПТИМАЛЬНИЙ ВИБІР СИЛ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПОЖЕЖІ В РЕЗЕРВУАРНІЙ ГРУПІ

Розглянуто оптимальний вибір сил і засобів для охолодження резервуарів в резервуарній групі при пожежі в одному із резервуарів. Під оптимальністю розуміється вибір сил та засобів, які будуть забезпечувати таку інтенсивність подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуарів, що не горять, при якій відповідні частини резервуарів не будуть нагріватися до критичних значень температури. В якості критерію оптимальності можуть бути обрані: мінімальні витрат води, мінімальна кількість особового складу або мінімальна кількість автоцистерн, що забезпечують подання води. Запропонований підхід спирається на модель охолодження резервуара водною плівкою, яка враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки або покрівлі резервуара з осередком горіння, водною плівкою, навколишнім середовищем і внутрішнім простором резервуара. Для розв'язання задачі спочатку розраховується така інтенсивність подачі води, що забезпечує охолодження стінки і покрівлі резервуара до безпечних значень температури. Далі, виходячи з характеристик пожежних стволів, розраховується їх кількість, яка забезпечує розраховану інтенсивність подачі води стволами даного типу. Це дозволяє визначити оптимальний вибір сил та засобів за обраним критерієм. Показано, що на найбільшу небезпеку наражається резервуар з навітряного боку відносну резервуара, що горить. При цьому тепловий потік до його покрівлі при горінні горючої рідин сягає максимальних значень при легкому вітрі (1,6÷3,4) м/с, а для легкозаймистих монотонно зростає із зростанням швидкості вітру в діапазоні (0÷10) м/с. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки. Отримані результати можуть бути використані для побудови плану локалізації і ліквідації пожежі в резервуарній групі з нафтою і нафтопродуктами.

Ключові слова: пожежа в резервуарі, тепловий вплив пожежі, локалізація пожежі, охолодження водою

1. Вступ

Резервуарні парки є основним місцем зберігання нафтопродуктів в процесі їх переробки і транспортування. Гасіння пожежі в резервуарних парках ускладнено небезпекою вибуху сусідніх з пожежею резервуарів, що відбувається внаслідок теплового впливу на них. Поширення пожежі на сусідні резервуари призводить не лише до збільшення матеріальних втрат, а й становить загрозу життю особового складу, що приймає участь у гасінні пожежі. Одним із таких прикладів є пожежа на нафтобазі БРСМ-Нафта (м. Васильків, Київська обл., 2015 р.), коли під час її ліквідації загинули четверо рятувальників. В [1] проаналізовано 224 великих аварії і відзначено, що багатьом з них був притаманний «ефект доміно» тобто таких ситуацій, коли одна аварія, навіть відносно незначна, створює підґрунтя для іншої. В [2] відзначається, що пожежі спричиняють майже 43 % усіх «ефектів доміно», причому найбільш поширеним сценарієм є пожежа в резервуарі або розливу горючої рідини.

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

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [3] проведено статистичний аналіз 1144 аварій, що мали місце в резервуарних парках. З них 100 класифіковано як аварії, які супроводжувалися ефектом доміно-

но. Визначено найбільш вірогідні послідовності причинних факторів для ініціювання аварій типу «доміно». Але питання щодо запобігання розповсюдженню аварії залишається відкритим. В [4] з використанням методу пробіт-функцій визначено критичну теплову дозу для відмови обладнання. Це дозволяє враховувати вплив первинного та кількох вторинних сценаріїв пожежі на подальше спричинення ефекту доміно, і отримати час до подальших відмов. Але такий підхід не враховує метеорологічних умов і, зокрема, напрямку і швидкості вітру, що істотно впливають на тепловий потік від пожежі до певного технологічного об'єкта. В [5] проведено ймовірнісний аналіз відмов, які здатні призвести до каскадного розповсюдження аварії. Такий підхід дозволяє виявити слабкі місця в системі пожежної безпеки, але не дає відповіді про шляхи її покращення. В [6] за допомогою нейронної мережі визначається критичний час перебування резервуара з горючої рідиною під тепловим впливом пожежі. Недоліком такого підходу є те, що він спирається на статистику, а не на фізичні процеси. Як наслідок, побудована модель є вірною лише в діапазоні тих статистичних даних, на які вона спирається. Ймовірнісна модель розповсюдження ланцюга доміно розглянута в [7], але і тут без відповіді залишається питання щодо вибору сил і засобів для локалізації аварії. Прогнозуванню і попередженню каскадних аварій присвячено [8], але запобігання розглянуто лише з точку зору профілактики, а не ліквідації аварії.

В [9] досліджено безпечну відстань між пожежею горючої рідини і резервуаром. Але такий підхід не є ефективним для переробних підприємств, де концентрація значних об'ємів горючих рідин на відносно невеликій площі обумовлено технологічними процесами. В [10] побудовано модель теплового впливу пожежі на резервуар зі скрапленим природним газом. Але питання захисту резервуара залишається не розглянутим. В [11] побудовано модель нагріву резервуара з горючою рідиною під тепловим впливом від кількох осередків горіння. Але захист резервуара шляхом його охолодження залишено поза увагою.

В [12] наведено вимоги щодо інтенсивності подачі води на охолодження резервуара, що горить, і сусідніх з ним резервуарів, але вони не враховують впливу вітру і типу рідини, що горить, на тепловий потік від пожежі. В [13] побудовано модель охолодження стінки резервуара водною плівкою, що стікає по ній. Модель враховує променевий і конвекційний теплообмін з осередком горіння, навколишнім середовищем та внутрішнім простором резервуара. Але визначення інтенсивності подачі води, що забезпечує охолодження до безпечних значень температури, в роботі не розглядається. В [14] побудовано алгоритм визначення інтенсивності подачі води на охолодження резервуара в умовах пожежі, але сили і засоби, які можуть забезпечити визначений режим, залишено поза увагою. В той же час на початковій стадії локалізації пожежі має місце дефіцит сил та засобів.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми розповсюдження пожежі на сусідні резервуари внаслідок впливу теплового потоку на них є вибір сил та засобів для подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуара.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оптимізація вибору сил та засобів для подачі води на охолодження стінки і покрівлі резервуара в умовах пожежі в сусідньому резервуарі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– визначити інтенсивність подачі води на охолодження при пожежі в резервуарній групі;

– визначити витрати води на охолодження сусідніх резервуарів;

© О. Є. Басманов, М. В. Максименко, В. В. Олійник

– провести розрахунок сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є дії пожежно-рятувальних підрозділів щодо охолодження резервуарів в умовах пожежі нафтопродукту в одному із резервуарів резервуарної групи. Предметом дослідження є оптимізації сил та засобів для подачі води на охолодження резервуарів, які не горять. Основна гіпотеза дослідження – перерозподіл сил та засобів для охолодження резервуарів, сусідніх з тим, що горить, дозволяє зробити це меншими силами, забезпечивши при цьому достатню ефективність охолодження. Для знаходження розподілу температур по стінці і покрівлі резервуара використано модель теплового балансу резервуара в умовах теплового впливу пожежі і охолодження водою. Для чисельного розв'язання системи рівнянь теплового балансу використано метод скінчених різниць. Програмну реалізацію моделей і алгоритмів виконано за допомогою середовища розробки Delphi 11 (Community Edition).

5. Вибір сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

5.1. Визначення інтенсивності подачі води на охолодження резервуарів

Розглянемо пожежу в резервуарній групі з чотирьох резервуарів РВС (рис. 1), що знаходяться на нормативній відстані 0,75D один від одного, де D – діаметр резервуара.

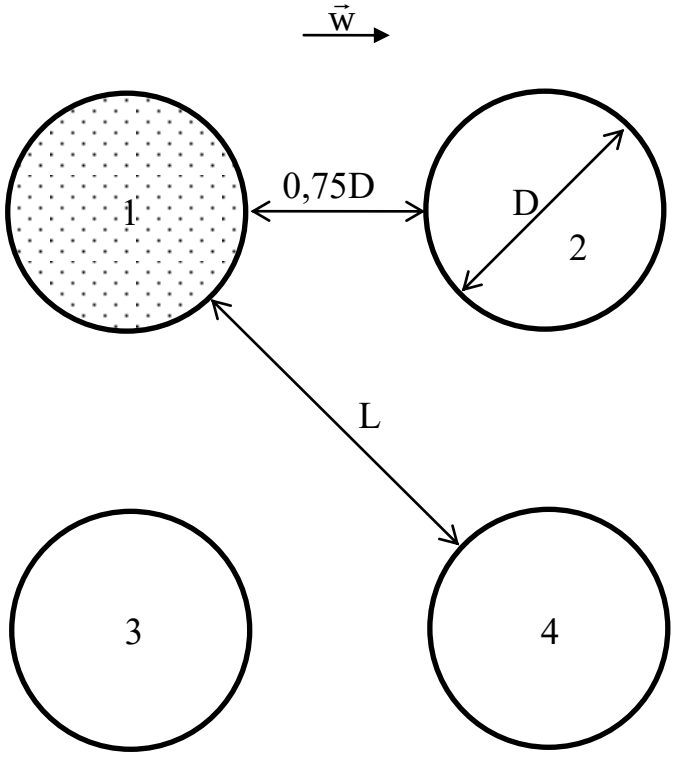


Рис. 1. Пожежа в резервуарній групі із чотирьох резервуарів РВС: 1 – резервуар, що горить; 2, 3, 4 – інші резервуари в групі

Напрямок вітру співпадає з напрямком від резервуара 1, що горить, до резервуара 2. При цьому відстань між резервуаром 1 і 4 буде складати:

$$L = \left(1{,}75\sqrt{2} - 1\right)D \approx 1{,}47D\,. \qquad (1)$$

В [14] побудовано модель вибору оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара в залежності від напрямку та швидкості вітру. Результати її застосування до резервуарної групи з чотирьох резервуарів РВС-10000 (діаметром 28,5 м і висотою 18 м) для різних швидкостей вітру (за 12-бальною шкалою Бофорта) наведені в табл. 1.

Табл. 1. Інтенсивність подачі води на охолодження стінки сусідніх резервуарів

Продукт	Резервуар	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)			
		Штиль, u=(0÷0,3) м/с	Легкий, u=(1,6÷3,4) м/с	Помірний, u=(5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u=(8,0÷10,7) м/с
Нафта	2	0,27	0,35	0,37	0,37
	3	0,27	0,21	0,08	0,03
	4	0,14	0,14	0,07	0,03
Бензин	2	0,47	0,90	1,05	1,09
	3	0,47	0,38	0,16	0,11
	4	0,26	0,27	0,17	0,12
Дизельне паливо	2	0,30	0,55	0,58	0,58
	3	0,30	0,24	0,09	0,05
	4	0,16	0,16	0,09	0,05
Мазут	2	0,19	0,35	0,37	0,37
	3	0,19	0,15	0,04	–
	4	0,09	0,10	0,05	–

Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара наведена в табл. 2.

Табл. 2. Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі сусідніх резервуарів

Продукт	Резервуар	Розрахована інтенсивність, л/(м·с)			
		Штиль, u=(0÷0,3) м/с	Легкий, u=(1,6÷3,4) м/с	Помірний, u=(5,5÷7,9) м/с	Свіжий, u=(8,0÷10,7) м/с
Нафта	2	0,44	0,62	0,56	0,48
	3	0,41	0,31	0,11	0,04
	4	0,17	0,16	0,04	–
Бензин	2	0,80	1,33	1,44	1,45
	3	0,73	0,54	0,21	0,14
	4	0,33	0,32	0,14	0,09
Дизельне паливо	2	0,50	0,70	0,64	0,54
	3	0,46	0,34	0,12	0,06
	4	0,19	0,18	0,07	0,01
Мазут	2	0,32	0,45	0,41	0,35
	3	0,29	0,21	0,06	–
	4	0,12	0,11	0,01	–

Особливістю подачі води на охолодження резервуару за допомогою пересувної техніки або стаціонарно встановлених гідромоніторів є те, що частина води після удару струменя об стінку відскакує, не приймаючи участі в охолодженні.

5.2. Визначення витрати води на охолодження сусідніх резервуарів

Оскільки охолоджуватися має півпериметр сусіднього резервуара, обернений в бік пожежі, то витрати води на його охолодження описуються виразами:

$$G_w = 0{,}5\pi I_w D; \qquad G_r = 0{,}5\pi I_r D,$$

© О. Є. Басманов, М. В. Максименко, В. В. Олійник

де I_w, I_r – інтенсивності подачі води на охолодження стінки і покрівлі відповідно; G_w, G_r – витрати води на охолодження стінки і покрівлі.

Витрати води стволом залежать від його діаметру і напору – табл. 3 [15].

Табл. 3. Витрати води пожежними стволами

Ствол	Діаметр ствола, мм	Напір води, м		
		20	40	60
Лафетний	25	9,7	13,6	21
А	19	5,4	7,4	9
Б	13	2,7	3,7	4,5

З урахуванням коефіцієнта використання води k_s ствол може забезпечити подачу води на охолодження стінки:

$$Q_w = k_s Q,$$

де Q – витрати води пожежним стволом (табл. 3).

При охолодженні покрівлі будемо вважати коефіцієнт використання води рівним 1, оскільки в цьому випадку не відбувається відбиття води при ударі. Тоді необхідна кількість стволів для подачі води на охолодження стінки n_w і покрівлю n_r може бути обчислена за формулою:

$$n_w = \left[\frac{G_w}{Q_w}\right] = \left[\frac{\pi I_w D}{2k_s Q}\right], \quad (2)$$

$$n_r = \left[\frac{G_r}{Q}\right] = \left[\frac{\pi I_r D}{2Q}\right], \quad (3)$$

де квадратні дужки означають округлення до цілого.

5.3. Розрахунок сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

Задача оптимального вибору сил та засобів для охолодження резервуарів в резервуарній групі має вигляд:

$$\begin{gathered} f(n, d, h_w) \to \min_{n,d,h_w}; \\ T_w(n, d, h_w) < T_{max}; \\ T_{wc}(n, d, h_w) < T_b; \\ T_r(n, d, h_w) < T_{max}; \\ T_{rc}(n, d, h_w) < T_b, \end{gathered}$$

де $n=n_w+n_r$ – загальна кількість стволів, що приймає участь в охолодженні сусідніх резервуарів; d – діаметр насадка; h_w – напір води; T_w, T_r – температура стінки та покрівлі резервуара, що охолоджується; T_{wc}, T_{rc} – температура води, що стікає по стінці і покрівлі резервуара; T_{max} – максимально припустима температура нагріву сталевих конструкцій резервуара; T_b=100 ºС – температура кипіння води. В якості функції f(n, d, h_w) може бути обрано:

- кількість особового складу, залученого до охолодження;
- кількість пожежних автомобілів, що забезпечують роботу даного типу пожежних стволів;

• витрати води пожежними стволами.

Розглянемо в якості приклада горіння в резервуарній групі РВС-10000 з нафтою в умовах легкого вітру (u=(1,6÷3,4) м/с), направленого від резервуара 1 в бік резервуара 2 (рис. 1). Підстановка в формулу (2) інтенсивності подачі води із табл. 1 і витрат води стволом із табл. 3 дозволяє розрахувати кількість стволів, необхідних для охолодження певного резервуара. Із умови про охолодження всього півпериметра з боку пожежі випливає, що необхідно задіяти щонайменше два стволи. Результати розрахунків наведені в табл. 4.

Табл. 4. Сили і засоби для охолодження стінок сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Нафта; вітер легкий, u=(1,6÷3,4) м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	7	14	3,5	51,8*
		60	6	12	3*	54,0
	Б	40	14	14	3,5	51,8*
		60	12	12	3*	54,0
	Лаф.	40	4	12	4	54,4
		60	3	9*	3*	63,0
3	А	40	5	10	2,5	37,0
		60	4	8	2	36,0
	Б	40	9	9	2,25	33,3
		60	7	7	1,75*	31,5*
	Лаф.	40	3	9	3	40,8
		60	2	6*	2	42,0
4	А	40	3	6	1,5	22,2*
		60	3	6	1,5	27,0
	Б	40	6	6	1,5	22,2*
		60	5	5*	1,25*	22,5
	Лаф.	40	2	6	2	27,2
		60	2	6	2	42

Табл. 5. Сили і засоби для охолодження покрівель сусідніх резервуарів

Резервуар	Ствол	Напір, м	Нафта; вітер легкий, u=(1,6÷3,4) м/с			
			Стволів	Особовий склад	Автомобілів	Витрати води, л/с
2	А	40	4	8	2	29,6
		60	3	8	1,5	27,0
	Б	40	8	8	2	29,6
		60	6	6	1,5	27,0
	Лаф.	40	2	6	2	27,2
		60	1	3*	1*	21,0*
3	А	40	2	4	1	14,8
		60	2	4	1	18,0
	Б	40	4	4	1	14,8
		60	3	3*	0,75*	13,5*
	Лаф.	40	1	3*	1	13,6
		60	1	3*	1	21,0
4	А	40	1	2*	0,5*	7,4*
		60	1	2*	0,5*	9,0
	Б	40	2	2*	0,5*	7,4*
		60	2	2	0,5*	9,0
	Лаф.	40	1	3	1	13,6
		60	1	3	1	21,0

© О. Є. Басманов, М. В. Максименко, В. В. Олійник

Розрахунок сил і засобів було проведено в припущенні, що ствол Б потребує одного ствольщика, ствол А – 2, лафетний ствол – 3; автомобіль АЦ-40 забезпечує роботу одного лафетного ствола або 2-х стволів А, або 4-х стволів Б [15]. Зірочкою (*) відмічені мінімальні значення для даного резервуара за відповідним критерієм.

6. Обговорення результатів вибору сил та засобів для охолодження сусідніх резервуарів

Чинні рекомендації щодо гасіння пожеж в резервуарних парках з нафтою і нафтопродуктами [12] при розрахунку часу, протягом якого стінка сусіднього резервуара може досягти критичної температури, спираються на експериментальні дані щодо пожежі в резервуарі РВС-5000 з мазутом. При цьому не враховано ні відмінностей теплового потоку при пожежі різних видів нафтопродуктів, ні впливу вітру. Тому при розгляді пожежі в резервуарній групі (рис. 1) було використано модель охолоджуючої дії водної плівки на резервуар, що нагрівається під тепловим впливом пожежі в сусідньому резервуарі [13]. Вказана модель враховує променевий і конвекційний теплообмін стінки резервуара з пожежею, навколишнім середовищем, внутрішнім простором резервуара, а також бере до уваги нахил полум'я вітром.

Для кожного з резервуарів, що не горять (рис. 1), для чотирьох видів нафтопродукту (сира нафта, бензин, дизельне паливо, мазут) було визначено оптимальну інтенсивність подачі води на охолодження стінки (табл. 1) та покрівлі (табл. 2). Під оптимальною розуміється мінімальна інтенсивність подачі води, що забезпечує охолодження стінки і покрівлі резервуара до безпечних значень температури.

Аналіз даних, наведених в табл. 1 свідчить, що наявність вітру збільшує тепловий потік до резервуару 2, тим самим потребуючи більшої інтенсивності подачі води на охолодження цього резервуара. Зокрема, при помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні зростають в 1,5÷2 рази. В той же час потреба в охолодженні резервуара 3 спадає із зростанням швидкості вітру. Наприклад, вже при помірному вітрі необхідна інтенсивність подачі води на охолодження стінки зменшується приблизно в 3 рази. Для резервуара 4 потреби в охолодженні при штилі і легкому вітрі знаходяться на приблизно однаковому рівні, але вже при помірному вітрі необхідна інтенсивність падає майже в 2 рази.

Наявність вітру також збільшує тепловий потік до покрівлі резервуара 2, внаслідок чого вона потребує більшого охолодження (табл. 2). При цьому максимальна потреба в охолодженні для горючих рідини (нафта, дизельне паливо, мазут) має місце при легкому вітрі. Подальше зростання його швидкості призводить до деякого зменшення теплового потоку від пожежі. Для легкозаймистих рідин (бензин) тепловий потік від пожежі до резервуара 2 монотонно зростає із збільшенням швидкості вітру. Причиною цього є більша довжина факела при горінні легкозаймистих рідин порівняно з горючими. Для резервуара 3 потреба в охолодженні спадає зі збільшенням швидкості вітру. Зокрема, для помірного вітру необхідна інтенсивність охолодження в 2÷4 рази менша порівняно зі штилем. Інтенсивність подачі води на охолодження покрівлі резервуара 4 при штилі і легкому вітрі знаходиться приблизно на одному рівні (як і для охолодження його стінки – табл. 1). Але при подальшому зростанні швидкості вітру потреба в охолодженні стрімко падає, а для випадку пожежі сирої нафти або мазуту при свіжому вітрі взагалі немає необхідності в охолодженні покрівлі.

Для подачі води на охолодження резервуарів за допомогою пересувної техні-

ки можуть бути використані стволи різних типів: А, Б, лафетні. Вони відрізняються один від одного як витратами води (табл. 3), так і кількістю особового складу, що забезпечує їх роботу. Отже забезпечити подачу води з інтенсивністю, наведеною в табл. 1 і табл. 2 можна різними способами. Враховуючи дефіцит сил та засобів на початковій стадії локалізації пожежі, виникає необхідність забезпечити достатню інтенсивність подачі води, задіявши мінімальну кількість сил та засобів.

Особливістю подачі води на охолодження стінки є відбиття частини води після удару об неї, внаслідок чого відбитий об'єм води вже не приймає участі в охолодженні. Експериментальні дослідження свідчать, що в діапазоні швидкостей, які має струмінь води в момент удару о стінку резервуара, коефіцієнт використання води складає близько 30 %.

На прикладі пожежі в резервуарній групі з сирою нафтою в умовах легкого вітру для стволів різного типу розраховано їх кількість при напорі води 40 м і 60 м – табл. 4 і табл. 5. Виходячи з кількості стволів, визначено кількість особового складу і автомобілів, що забезпечують їх роботу. Відзначимо, що обрати тип ствола і напір води так, щоб одночасно мінімізувати кількість задіяного особового складу, кількість пожежних автомобілів та витрати води, не завжди можливо. Наприклад, за критерієм мінімуму задіяного особового складу для охолодження резервуара 2 доцільно обрати 3 лафетних стволи з напором 60 м. Це призводить до витрат води 63 л/с у той час, як мінімальні витрати води (51,8 л/с) досягаються використанням 14 стволів Б, тобто різниця складає 1,2 рази.

Обмеженням запропонованого підходу є те, що він може бути застосований до резервуарної групи із резервуарів типу РВС зі стаціонарної покрівлею.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з визначенням безпечного місця для розташування особового складу і техніки, задіяних у локалізації і ліквідації пожежі.

7. Висновки

1. З використанням моделі теплового впливу пожежі в резервуарі на сусідні резервуари визначено необхідні інтенсивності подачі води на охолодження стінок і покрівлі резервуарів в резервуарній групі. На найбільшу небезпеку наражається резервуар, розташований з навітряного боку. При помірному і свіжому вітрі (за шкалою Бофорта) потреби в охолодженні його стінки зростають в 1,5÷2 рази порівняно зі штилем. Наявність вітру також збільшує тепловий потік до покрівлі навітряного резервуара, внаслідок чого він потребує більшого охолодження. При цьому максимальна потреба в охолодженні для горючих рідини (нафта, дизельне паливо, мазут) має місце при легкому вітрі. Для легкозаймистих рідин (бензин) тепловий потік від пожежі до цього резервуара монотонно зростає зі збільшенням швидкості вітру. Причиною цього є більша довжина факела при горінні легкозаймистих рідин.

2. Визначено кількість пожежних стволів, що забезпечують необхідну інтенсивність охолодження стінок або покрівлі резервуара в залежності від типу ствола і напору води. Враховано, що частина води після удару об стінку відбивається і не приймає участі в її охолодженні. Виходячи з кількості пожежних стволів визначено кількість особового складу і автомобілів АЦ-40, що забезпечують їх роботу. Показано, що витрати води в залежності від обраного типу ствола і напору можуть відрізнятися до 50 %.

3. Сформульовано задачу оптимального вибору сил та засобів для охолодження

© О. Є. Басманов, М. В. Максименко, В. В. Олійник

резервуарів, сусідніх з тими, що горять. Показано, що в залежності від обраного критерію оптимізації (мінімальні витрати води, мінімальна кількість задіяного особового складу або автоцистерн) задача має різні розв'язки. Дискретний характер зміни таких параметрів, як діаметр насадка і кількість пожежних стволів, дозволяє розв'язати задачу оптимізації шляхом повного перебору.

Література

1. 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

2. 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

3. Hou L., Wu X., Wu Z., Wu S. Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 193. P. 106646. doi: 10.1016/j.ress.2019.106646

4. Zhou J., Reniers G., Cozzani V. Improved probit models to assess equipment failure caused by domino effect accounting for dynamic and synergistic effects of multiple fires. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 154. P. 306–314. doi: 10.1016/j.psep.2021.08.020

5. Ovidi F., Zhang L., Landucci G., Reniers G. Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. Reliability Engineering & System Safety. 2021. Vol. 209. P. 107476. doi: 10.1016/j.ress.2021.107476

6. Tamascelli N., Scarponi G. E., Amin M. T., Sajid Z., Paltrinieri N., Khan F., Cozzani V. A neural network approach to predict the time-to-failure of atmospheric tanks exposed to external fire. Reliability Engineering & System Safety. 2024. Vol. 245. P. 109974. doi: 10.1016/j.ress.2024.109974

7. Men J., Chen G., Yang Y., Reniers G. An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks. Reliability Engineering & System Safety. 2022. Vol. 226. P. 108723. doi: 10.1016/j.ress.2022.108723

8. Khan F., Amin M. T., Cozzani V., Reniers G. Domino effect: Its prediction and prevention – An overview. Methods in Chemical Process Safety. 2021. P. 1–35. doi: 10.1016/bs.mcps.2021.05.001

9. Yang R., Khan F., Neto E. T., Rusli R., Ji J. Could pool fire alone cause a domino effect? Reliability Engineering & System Safety. 2020. Vol. 202. P. 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976

10. Iannaccone T., Scarponi G. E., Landucci G., Cozzani V. Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 149. P. 735–749. doi: 10.1016/j.psep.2021.03.027

11. Yang J., Zhang M., Zuo Y., Cui X., Liang C. Improved models of failure time for atmospheric tanks under the coupling effect of multiple pool fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023. Vol. 81. P. 104957. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104957

12. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і

нафтопродуктами. НАПБ 05.02. 2003.

13. Максименко М. В. Модель охолодження стінки резервуара водою при пожежі в сусідньому резервуарі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 156–170. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-11

14. Basmanov O., Maksymenko M. Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Vol. 2(38). P. 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-1

15. Довідник керівника гасіння пожеж / За заг. ред. В. С. Кропивницького. 2016.

O. Basmanov, *DSc, Professor, Chief Researcher of the Department*
M. Maksymenko, *Adjunct*
V. Oliinyk, *PhD, Associated Professor, Head of Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

THE OPTIMAL CHOICE OF FORCES AND MEANS FOR COOLING THE TANK IN CASE OF FIRE IN THE TANK GROUP

The optimal choice of forces and means for cooling tanks in a tank group in the event of a fire in one of the tanks is considered. Optimality means the choice of forces and means that will ensure such intensity of water supply for cooling the walls and roofs of non-burning tanks, at which the corresponding parts of the tanks will not heat up to critical temperature values. As a criterion of optimality, the following can be selected: minimum water consumption, minimum number of personnel or minimum number of tankers providing water supply. The proposed approach is based on the model of cooling the tank with a water film, which takes into account the radiation and convection heat exchange of the wall or roof of the tank with the combustion center, the water film, the environment and the internal space of the tank. To solve the problem of optimal selection of forces and means, the intensity of water supply is first calculated, which ensures cooling of the wall and roof of the tank to safe temperature values. Next, based on the characteristics of the fire hydrants, their number is calculated, which ensures the calculated intensity of water supply through the hydrants of this type. This, in turn, allows determining the optimal choice of forces and means according to the selected criterion. It is shown that the tank on the windward side relative to the burning tank is exposed to the greatest danger. At the same time, the heat flow to its roof during the burning of combustible liquids reaches maximum values in light wind – (1.6÷3.4) m/s, and for flammable liquids it increases monotonically with increasing wind speed in the range of (0÷10) m/s. The obtained results can be used to build a plan for the localization and elimination of a fire in a tank group with oil and oil products.

Keywords: tank fire, thermal influence of fire, fire localization, water cooling

References

1. 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

2. 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

3. Hou, L., Wu, X., Wu, Z., Wu, S. (2020). Pattern identification and risk prediction of domino effect based on data mining methods for accidents occurred in the tank farm. Reliability Engineering & System Safety, 193, 106646. doi: 10.1016/j.ress.2019.106646

4. Zhou, J., Reniers, G., Cozzani, V. (2021). Improved probit models to assess equipment failure caused by domino effect accounting for dynamic and synergistic ef-

© О. Є. Басманов, М. В. Максименко, В. В. Олійник

fects of multiple fires. Process Safety and Environmental Protection, 154, 306–314. doi: 10.1016/j.psep.2021.08.020

5. Ovidi, F., Zhang, L., Landucci, G., Reniers, G. (2021). Agent-based model and simulation of mitigated domino scenarios in chemical tank farms. Reliability Engineering & System Safety, 209, 107476. doi: 10.1016/j.ress.2021.107476

6. Tamascelli, N., Scarponi, G. E., Amin, M. T., Sajid, Z., Paltrinieri, N., Khan, F., Cozzani, V. (2024). A neural network approach to predict the time-to-failure of atmospheric tanks exposed to external fire. Reliability Engineering & System Safety, 245, 109974. doi: 10.1016/j.ress.2024.109974

7. Men, J., Chen, G., Yang, Y., & Reniers, G. (2022). An event-driven probabilistic methodology for modeling the spatial-temporal evolution of natural hazard-induced domino chain in chemical industrial parks. Reliability Engineering & System Safety, 226, 108723. doi: 10.1016/j.ress.2022.108723

8. Khan, F., Amin, M. T., Cozzani, V., Reniers, G. (2021). Domino effect: Its prediction and prevention – An overview. Methods in Chemical Process Safety, 1–35. doi: 10.1016/bs.mcps.2021.05.001

9. Yang, R., Khan, F., Neto, E. T., Rusli, R., Ji, J. (2020). Could pool fire alone cause a domino effect? Reliability Engineering & System Safety, 202, 106976. doi: 10.1016/j.ress.2020.106976

10. Iannaccone, T., Scarponi, G. E., Landucci, G., Cozzani, V. (2021). Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire. Process Safety and Environmental Protection, 149, 735–749. doi: 10.1016/j.psep.2021.03.027

11. Yang, J., Zhang, M., Zuo, Y., Cui, X., Liang, C. (2023). Improved models of failure time for atmospheric tanks under the coupling effect of multiple pool fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 81, 104957. doi: 10.1016/j.jlp.2022.104957

12. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and oil products. NAPB 05.02.

13. Maksymenko, M. (2023). A model of cooling the tank shell by water in the case of a fire in an adjacent tank. Problems of emergency situations, 1(37), 156–170. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-11

14. Basmanov, O., Maksymenko, M. (2023). Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling. Problems of emergency situations, 2(38), 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2023-38-1

15. Handbook of the head of fire fighting / In general ed. V. Kropyvnytskyi, 320.

Надійшла до редколегії: 02.03.2024
Прийнята до друку: 12.04.2024

УДК 623.48:614.833:519.8

І. М. Неклонський, *к.військ.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-5561-4945)*
О. М. Смирнов, *ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-1237-8700)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

РИЗИК-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ПРОТИТАНКОВИХ РЕАКТИВНИХ СНАРЯДІВ

Запропонований набір і послідовність операцій з розрядження протитанкових керованих реактивні снарядів. При цьому забезпечується раціональне вилучення всіх необхідних компонентів для подальшого використання у новій якості. Для підвищення ефективності процесу управління технологічним ризиком під час впровадження відповідної технології запропонований спосіб обробки експертно-лінгвістичної інформації під час кількісної оцінки прийнятих рішень щодо мінімізації ризиків, який базується на застосуванні методів теорії нечітких множин. Реалізація цього способу передбачає опис підмножин терм-множини системою з п'яти відповідних функцій належності трапецеїдального виду відносно вузлових точок з подальшим розв'язанням задачі засобами теорії нечітких множин. Для обробки експертної інформації застосовується статистичний метод, що дає можливість дослідити вплив відмов у кожній складовій (технологічній операції) на стан системи. Для комплексної оцінки застосовано метод ранжування, який базується на ідеї розподілу міри належності елементів універсальної множини відповідно до їх рангів. Для визначення коефіцієнтів пріоритетності частинних факторів використаний метод Фішберна. Отримано значення узагальненого адитивного показника ризику, який буде характеризувати процес утилізації в так званому ідеальному середовищі. Передбачено, що ризик виникнення аварії в реальному середовищі буде оцінюватись за ступенем відхилення від показника ідеального середовища. Даний підхід розглянуто в межах моделі управління ризиками, яка передбачає застосування методу марківського аналізування за концепцією «станів» («готовність», «відмова»). Це дає можливість під час експертного оцінювання ризику обробити результати методами формальної логіки. Робота є продовженням циклу досліджень направлених на розроблення та впровадження нових високоефективних технологій утилізації боєприпасів.

Ключові слова: боєприпаси, утилізація, технологія, модель управління, ризик, нечітка множина, матриця

1. Вступ

Відповідно до «Порядку утилізації ракет, боєприпасів і вибухових речовин», який затверджений Кабінетом Міністрів України у 2006 році, технологічна політика утилізації боєприпасів насамперед має забезпечити безпеку персоналу, навколишнього природного середовища і населення від шкідливого впливу виробничих процесів та продуктів утилізації. Водночас забезпечення високого рівня техногенної та екологічної безпеки під час утилізації боєприпасів є однією з головних проблем у діяльності національної системи утилізації. На сьогоднішній день існуючі технології не задовольняють постійно зростаючих вимог до ефективності і безпеки відповідних процедур.

Особливо гостро стоїть це питання щодо утилізації реактивних боєприпасів. Так, в Україні зберігаються протитанкові керовані реактивні снаряди (ПТКРС) марки ПТКРС 9М14М (рис. 1) з закінченим терміном придатності, що потребують негайної утилізації. Їх заборонено використовувати збройними формуваннями України під час бойових дій, які ведуться на території держави. Крім того, у відкритих інформаційних джерелах, які висвітлюють динаміку збройної агресії рф проти України, неодноразово з'являється інформація, що агресор використовує великий спектр боєприпасів, у тому числі із запасів колишнього СРСР із сум-

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

нівним терміном придатності. Тому, не виключено, що після деокупації території України будуть виявлені певні арсенали таких боєприпасів. ПТКРС 9М14М був розроблений для боротьби з рухомими і нерухомими броньованими цілями і вогневими точкам на віддалені від 500 м до 3000 м (рис. 1). Управління снарядом і наведення його на ціль здійснюється за допомогою команд, що передаються на снаряд через спеціальні дроти з пульта управління, при спостереженні снаряда і цілі через оптичний прилад. В даний час практично немає універсальної процедури утилізації ПТКРС, яка б дозволяла не тільки раціонально вилучати всі необхідні матеріали, а й оцінювати ефективність організації таких робіт, так як це впливає на рівень техногенної та екологічної безпеки.

Рис. 1. Реактивний снаряд 9М14М

Аналіз методів утилізації боєприпасів [1, 2] та «Державної цільової оборонної програми утилізації звичайних видів боєприпасів, не придатних для подальшого використання і зберігання» показує, що з практичної точки зору перевага надається знищенню та розбиранню боєприпасів із застосуванням відкритого спалювання та детонації. Вони, як правило на містять складних технологічних процесів промислового рівня.

Разом з тим, у країнах НАТО спостерігається тенденція розроблення технологій, які не передбачають відкритого спалювання або відкритої детонації. Крім того, однією з головних умов забезпечення техногенної і природної безпеки в економічно розвинених країнах стало управління ризиками під час впровадження відповідних технологій.

Таким чином, залишається актуальною проблема впровадження ризик орієнтованого підходу щодо утилізації протитанкових керованих реактивних снарядів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На сучасному етапі розвитку спостерігається тенденція розроблення технологій, які не передбачають відкритого спалювання або відкритої детонації. Але через відсутність відповідних технологічних рішень ще залишаються типи боєприпасів, утилізацію яких приходиться здійснювати відкритим способом.

Так, в роботі [3] проведений аналіз шкідливого впливу так званих відкритих технологій утилізації та впровадження нових. Серед альтернативних набувають подальшого розвитку технології, де присутні спеціальні установки, принцип дії яких оснований на використанні певного типу закритого горіння або локалізованої детонації. Але управління відповідними процесами автори розглядають тільки з позиції нормативно-технічного регулювання організації робіт у сфері захисту навколишнього середовища. Дослідження технологічних установок з утилізації стрілецької зброї [4], мобільних або модульних установок утилізації [4] стосуються певних технологічних особливостей та ефективності їх роботи. Але авторами не досліджується проблематика утилізації реактивних боєприпасів, крім того не досліджені питання щодо удосконалення системи управління техногенно-екологічною безпекою.

В роботі [6] авторами запропонована технологія утилізації, яка дозволяє енергетичний матеріал, що вивільняється, включити до складу вибухових речовин, що використовуються для цивільних потреб. Технологія є альтернативою традиційній утилізації, при якій відпрацьований енергетичний матеріал спалюється в статичній печі з обробкою димових газів. Однак, незважаючи на очевидні екологічні переваги, рекомендований авторами підхід може бути не життєздатним з урахуванням того, що використання вибухових речовин, вироблених з переробленого матеріалу різних партій та специфікацій, може привести до деяких варіацій у їхній продуктивності та характеристиках безпеки. Крім того, авторами не розглядається питання управління техногенно-екологічною безпекою запропонованого процесу.

Стаття [7] містить огляд досвіду та уроків, отриманих під час впровадження системного підходу до управління життєвим циклом боєприпасів в Боснії і Герцеговині. Під життєвим циклом автори розглядають увесь процес від планування до закупівлі (виготовлення), управління запасами та утилізації. При цьому, управління ризиками авторами розглядається як фундаментальний компонент системи управління запасами. Представлена інтегрована система управління ризиками базується на міжнародних стандартах. Разом з тим, автори акцентують увагу на взаємозв'язку між різними компонентами управління ризиками, також дають пояснення кожного компонента управління ризиками та методів для управління запасами. Саму процедуру оцінювання ризиків автори не розглядають.

Серед національних досліджень проблемам науково-технічного супроводження процесів утилізації боєприпасів присвячений цикл статей, в яких розглядаються проблемні питання утилізації тактичних ракет 9М21, авіаційних засобів ураження, 100 мм артилерійських пострілів УБК10 З 9М117, трасерів із артилерійських снарядів малих калібрів тощо. Останні дослідження «обумовлені необхідністю обґрунтування ефективних організаційних рішень щодо удосконалення технологічної політики утилізації боєприпасів». Авторами [8] «проведено формалізацію задачі оцінювання ефективності процесу утилізації, що дозволило оптимізувати рішення щодо управління таким процесом». Розв'язання передбачає вибір раціонального рішення з дотриманням принципу оптимальності, що є основою рішення задач динамічного програмування. Разом з тим, питання як враховувати ризики під час реалізації відповідного процесу утилізації, не досліджується.

В роботі [9] розроблена «модель управління ризиками відповідного технологічного процесу утилізації кумулятивних боєприпасів, яка враховує структурований підхід до реалізації управління ризиками та містить аналітичні залежності для кількісної оцінки прийнятих рішень щодо їх мінімізації». Разом з тим, потребує додаткових досліджень питання щодо застосування даної моделі до технологій утилізації реактивних боєприпасів. Крім того, автори залишили поза увагою дослідження способів використання експертно-лінгвістичної інформації під час кількісного оцінювання ризику. Адже в процесі експертного оцінювання з'являється множина нечітких змінних (лінгвістичних змінних), значення яких необхідно формалізувати в чіткі показники.

Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що в даний час практично немає ефективної технології утилізації протитанкових керованих реактивних снарядів, яка б дозволяла раціонально вилучати всі необхідні матеріали і одночасно забезпечувала б техногенну та екологічну безпеку під час виконанні всіх необхідних робіт. Крім того відсутні аналітичні інструменти щодо застосування управ-

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

лінських рішень з мінімізації встановлених ризиків під час управління відповідним процесом.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність високоефективної технології утилізації протитанкових керованих реактивних снарядів, яка не передбачає відкритого спалювання або відкритої детонації. Крім того, існуюча модель управління ризиками під час реалізації подібних технологій не описує спосіб обробки експертно-лінгвістичної інформації під час кількісної оцінки прийнятих рішень щодо мінімізації відповідних ризиків.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка ризик-орієнтованого підходу щодо впровадження технології утилізації протитанкових реактивних снарядів. Це дозволить підвищити рівень техногенної та екологічної безпеки процесу утилізації непридатних протитанкових керованих реактивних снарядів, шляхом розроблення технологічного процесу, який не передбачає відкритого спалювання або відкритої детонації. При цьому модель управління ризиками відповідного технологічного процесу має передбачати обробку експертно-лінгвістичної інформації під час кількісної оцінки прийнятих рішень щодо мінімізації відповідних ризиків.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

− розробити поетапний технологічний процес з розрядження технічно непридатних протитанкових керованих реактивних снарядів, який не передбачає відкритого спалювання або відкритої детонації, та, одночасно, дозволяє раціонально вилучати всі необхідні матеріали;

− розробити спосіб обробки експертно-лінгвістичної інформації під час експертної оцінки ризиків, застосування якого дасть можливість множину нечітких змінних (лінгвістичних змінних) формалізувати в чіткі показники, що дозволить підвищити ефективність процесу управління технологічним ризиком під час впровадження відповідної технології.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єкт дослідження – технологія утилізації боєприпасів. Предмет дослідження – технологічний процес з розрядження протитанкових керованих реактивних снарядів.

Дослідження має підтвердити гіпотезу, що знаючи будову протитанкового керованого реактивного снаряду можна розробити поетапний технологічний процес з його розрядження без застосування відкритого спалювання або відкритої детонації. При цьому для управління ризиками під час впровадження такої технології може бути використана модель, яка передбачає застосування методу марківського аналізування – концепцію «станів». Процес переходу між станами описується рівнянням Колгоморова, реалізація якого можлива, якщо результати експертного оцінювання ризику обробити методами формальної логіки. Це забезпечить перехід від якісних до кількісних показників під час обробки результатів експертних оцінок.

Методи дослідження визначаються сукупністю вирішуваних завдань і базуються на принципах конструювання, які використані під час розроблення технологічного процесу розряджання; методи аналізу, синтезу, експертних оцінок, марківського аналізування, статистичний, Фішберна, теорії нечітких множин, ранжування, які використані під час розроблення способу обробки експертно-

лінгвістичної інформації під час експертної оцінки ризиків. Застосування програмних засобів середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad дає можливість автоматизувати процес обробки результатів дослідження.

5. Розроблення технології утилізації протитанкових керованих реактивні снарядів

Для розв'язання поставленого наукового завдання пропонується технологія утилізації непридатних до використання ПТКРС. Відповідна технологія передбачає певний набір і послідовність операцій з розрядження реактивних снарядів при організації потокового методу проведення робіт (табл. 1). Технологічним об'єктом є 125 мм протитанковий керований реактивний снаряд ПТКРС 9М14М (рис. 1).

Для проведення робіт мають застосовуватись наступні технологічні засоби: технологічний стіл – 18 шт.; автонавантажувач – 1 шт.; пакетировщик ПЯ-004 – 1 шт.; ручна тачка типу Т-0,5 – 5 шт.; рольганги ТР-6 – 4 шт.; пластинчатий транспортер ПТ-1000 – 1 шт.; спеціальні верстати для вигвинчування елементів снаряду (трасера, стабілізатора, підривника) – 3 шт., бронекабіна – 2 шт., парогенератор – 1 шт.; зборки під елементи – 16 шт.; ємність для мастила – 3 шт.; ємність під фарбу та розчинник – 5 шт.; сертифікований інструмент для роботи з боєприпасами (пломбір, кусачки, ключ-вилка) – 2 компл.; гасило – 10 шт.;

Для виконання технологічних функцій необхідно залучити підготовлений персонал у кількості 23 осіб.

Особливо небезпечними є операції № 8–12, 15, де обертаються небезпечні елементами ПТКРС 9М14М: підривник, трасер 9Х44, сповільнювач-запальник, електрозапальник з двома МБ-2Н, розривний заряд, запальники із п/м ДРП-2, порохові заряди з нітрогліцеринового пороху.

6. Розроблення способу обробки експертно-лінгвістичної інформації під час оцінки ризиків

Для управління ризиками під час впровадження такої технології може бути використана відповідна модель [10]. Вона базується на вимогах міжнародних норм [0], імплементованих у національні стандарти ДСТУ IEC/ISO 31010:2013 і ДСТУ ISO 31000:2018.

Реалізація даної моделі «передбачає застосування методу марківського аналізування – концепцію «станів» («готовність», «відмова») і переходу між цими станами за припущення постійної ймовірності змінювання стану системи S (S_0 – працездатний стан; S_1 погіршений стан; S_2 – стан відмови)» [9]. Процес переходу між станами описується рівнянням Колгоморова.

Розв'язання рівняння Колгоморова для ймовірностей станів [9] та обробленя отриманих результатів дає можливість керівнику оцінити ефективність прийнятих рішень з мінімізації технологічних ризиків. Але при такому підході, необхідно врахувати, що під час кількісного і якісного оцінювання ризику, як правило, перевага віддається методу експертних оцінок.

Тоді виникає протиріччя між нечіткими знаннями і чіткими методами застосування механізмів формальної логіки. Так, в процесі експертного оцінювання для того, щоб дати словесний опис деякому нечіткому числу, отриманому в результаті певних операцій, з'являється множина нечітких змінних (лінгвістична змінна). Розв'язати це протиріччя можна з використанням спеціальних методів теорії нечітких множин [12, 13]. Крім того, впровадження нової технології утилізації

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

необхідно розглядати як новий інвестиційний проект. Тоді необхідно враховувати новітні методичні підходи і практичні рекомендації щодо управління проектними ризиками [14, 15].

Табл. 1. Перелік операцій під час розбирання ПТКРС 9М14М

Операція	Зміст операції
№ 1	Подача ПТКРС 9М14М в закупорюванні 9Я618 або 9Я641 зі сховища в приміщення обігріву цеху до технологічного столу (транспортеру). Вхідний контроль закупорювання
№ 2	Вилучення ПТКРС 9М14М із закупорювання 9Я618. Видалення стопорних вилок, відкривання замків та кришки ящика, огляд ракет на безпечність та допустимість до розбирання
№ 3	Вилучення ПТКРС 9М14М із 9Я641. Видалення стопорних вилок, відкривання замків та кришки ящика, огляд ракет на безпечність та допустимість до розбирання
№ 4	Подача ящиків 9Я618 або 9Я641 до місця пакування елементів, після розбирання ПТКРС 9М14М
№ 5	Закріплення ПТКРС 9М14М у пристосуванні, від'єднання бойової частини (БЧ) 9Н110М від рухової установки (РУ) та подача до місця розбирання
№ 6	Закріплення БЧ 9Н110М у пристосуванні та відкручування гвинтів і підтискної гайки. Вилучення підривника 9Э212 у бронекабіні, укладання їх у зборку
№ 7	Закріплення БЧ 9Н110М у пристосуванні та відкручування ковпака-обтічника, вилучення 16-ти прямокутних п'єзоелементів із $BaTiO_3$, укладання їх у зборку
№ 8	Установка корпусів БЧ 9Н110М у пароводяну ванну, нагрів до 65–75 °С. Подача корпусів 9Н110М на розбирання кумулятивного вузла
№ 9	Розбирання корпусів БЧ 9Н110М на елементи: збір вибухової речовини (А-IX-1), детонатора, мідних воронок, інертних лінз, вкладишів, трубок, втулок та прокладок, укладання їх у зборку
№ 10	Контроль корпусів БЧ 9Н110М на повноту видалення вибухової речовини, укладання їх у зборку
№ 11	Розряджання стартового двигуна рухової установки (СД РУ) розташованого у передній потовщеній частині РУ: Закріплення РУ (рухової установки) у пристосуванні, вигвинчування дна та зняття кільця. Вилучення: камери з 4-ма соплами, порохового заряду 9Х110, запальника сб.3 9Х110 з ДРП-2 і двома електрозапалами МБ-2Н та контактної колодки, укладання їх у зборку
№ 12	Розряджання маршового двигуна рухової установки (МД РУ): вилучення камери з термо-стійкою обмазкою В-58, порохового заряду сб.1 9Х110 і запальника сб.3 9Х110 з ДРП-2 і двома електрозапалами МБ-2Н, що угвинчений в сферичне дно камери, сповільнювач 9Х113М, соплові патрубки і насадки, вигвинтити фільтр, укладання їх у зборку
№ 13	Від'єднання крилевого відсіку від РУ: зняття трасера і обмежувача; розгвинчування гвинтів, зняття осей, 4-х крил та механізму стопоріння крил, укладання їх у зборку
№ 14	Від'єднання апаратурного блоку від РУ. Видалення рульової машинки (РМ), гіроскопа, розподільника і котушки з трижильним мікрокабелем дротяного зв'язку та вузла донної частини, укладання їх у зборку
№ 15	Пакування: вибухової речовини (А-IX-1); порохових зарядів; підривників 9Э212; сповільнювачів, електрозапальників МБ-2Н у пристосовані ящики. Закривання, пломбування та маркування ящиків
№ 16	Пакування елементів ПТКРС 9М14М у штатні ящики. Закривання, пломбування та маркування ящиків
№ 17	Знищення спеціального маркування на елементах виробу та маркування ящиків
№ 18	Видача ящиків з елементами ПТКРС 9М14М із цеху до місця зберігання
№ 19	Допоміжні операції: Різання паперу і просочення її парафіном. Сортування парафінованого паперу (б/в). Нарізання пломбувального дроту на шматки необхідної довжини. Виготовлення трафаретів і ярликів

З урахуванням [12–15] перейти від сукупності експертних оцінок до набору функцій належності, які утворюють нечіткий класифікатор, можна буде у наступний спосіб.

Нехай існує універсальна множина U, до якої відносяться всі результати спостережень. Нечітка множина A – це множина значень U – така, що кожному значенню U відповідає ступінь приналежності цього значення множини A. Тоді функцію належності $\mu(u)$ буде функція, областю визначення якої є U $(u \in U)$, а областю значень – одиничний інтервал [0, 1]. Чим вище $\mu(u)$, тим вище оцінюється ступінь приналежності елемента u нечіткій множині A.

Задамо лінгвістичну змінну (ЛЗ) $\Omega = \{\omega, T(\omega), U, G, M\}$, де ω – назва змінної; T – сукупність її лінгвістичних значень (терм-множина значень); G – синтаксичне правило, що породжує терми множини T; M – семантичне правило, яке кожному лінгвістичному значенню ω ставить у відповідність його сенс $M(\omega)$, причому $M(\omega)$ позначає нечітку підмножину U.

Тоді є доцільним побудувати нормальний нечіткий інтервал $(I = a; b; c; d)$ із трапецієподібною функцією належності вигляду:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} 0, \text{ якщо } x \le a, \\ \dfrac{x-a}{b-a}, \text{ якщо } a < x < b, \\ 1, \text{ якщо } b \le x \le c, \\ \dfrac{d-x}{d-c}, \text{ якщо } c < x < d, \\ 0, \text{ якщо } x \ge d. \end{cases} \quad (1)$$

Графік функції належності трапецієподібного нечіткого інтервалу наведено на рис. 2.

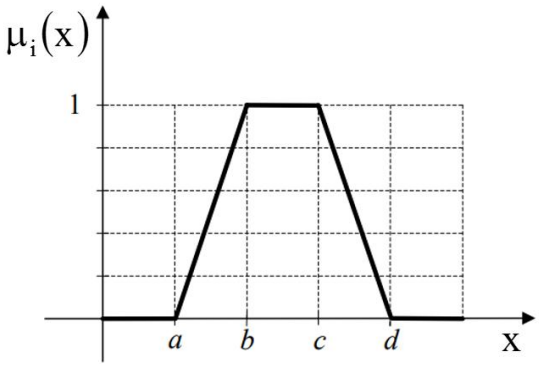


Рис. 2. Трапецієподібний нечіткий інтервал

Таким чином, сутність способу обробки експертно-лінгвістичної інформації зводиться до наступного. Вводиться лінгвістична змінна «Рівень показника» з терм-множиною значень {«дуже низький», «низький», «середній», «високий», «дуже високий»}. Для опису підмножин терм-множини вводяться системи з п'яти відповідних функцій належності трапецеїдального виду відносно вузлових точок. В подальшому задача розв'язується засобами матричної схеми. При цьому, з метою збільшення адекватності результатів обробки нечітких кількісних експертних оцінок доцільно враховувати особливості виявлення закономірностей уявлення

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

експертами наближених значень конкретних величин [16].

З урахуванням вище викладеного, обробка експертних висновків буде мати наступний порядок.

Визначимо такі терми лінгвістичної змінної «Ризик аварії»: T_1 – дуже низький (ДН), T_2 – низький (Н), T_3 – середній (С), T_4 – високий (В), T_5 – дуже високий (ДВ). Задаємо терми у вигляді трапецієвидних функцій належності четвірками чисел $\langle a; b; c; d \rangle$ з урахуванням вербально-числової шкали Харрінгтона [13, 17]:

$T_1 = \langle 0;0;0,15;0,25 \rangle$ – ДН;

$T_2 = \langle 0,15;0,25;0,35;0,45 \rangle$ – Н;

$T_3 = \langle 0,35;0,45;0,55;0,65 \rangle$ – С;

$T_4 = \langle 0,55;0,65;0,75;0,85 \rangle$ – В;

$T_5 = \langle 0,75;0,85;1;1 \rangle$ – ДВ.

Тоді, опис підмножин терм-множини можна здійснити шляхом введення системи з п’яти відповідних функцій належності трапецієподібного виду відносно вузлових точок на осі абсцис, а саме:

$$\mu_1(x) = \begin{cases} 1,\ 0 \le x \le 0,15; \\ 10 \cdot (0,25 - x),\ 0,15 < x < 0,25; \\ 0,\ 0,25 \le x \le 1. \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_2(x) = \begin{cases} 0,\ 0 \le x \le 0,15; \\ 10 \cdot (x - 0,15),\ 0,15 < x < 0,25; \\ 1,\ 0,25 \le x \le 0,35; \\ 10 \cdot (0,45 - x),\ 0,35 < x < 0,45; \\ 0,\ 0,45 \le x \le 1. \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_3(x) = \begin{cases} 0,\ 0 \le x \le 0,35; \\ 10 \cdot (x - 0,35),\ 0,35 < x < 0,45; \\ 1,\ 0,45 \le x \le 0,55; \\ 10 \cdot (0,65 - x),\ 0,55 < x < 0,65; \\ 0,\ 0,65 \le x \le 1. \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_4(x) = \begin{cases} 0,\ 0 \le x \le 0,55; \\ 10 \cdot (x - 0,55),\ 0,55 < x < 0,65; \\ 1,\ 0,65 \le x \le 0,75; \\ 10 \cdot (0,85 - x),\ 0,75 < x < 0,85; \\ 0,\ 0,85 \le x \le 1. \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_5(x) = \begin{cases} 0,\ 0 \le x \le 0,75; \\ 10 \cdot (0,75 - x),\ 0,75 < x < 0,85; \\ 1,\ 0,85 \le x \le 1. \end{cases} \quad (5)$$

Графічно система трапецієподібних функцій належності представлена на рис. 3.

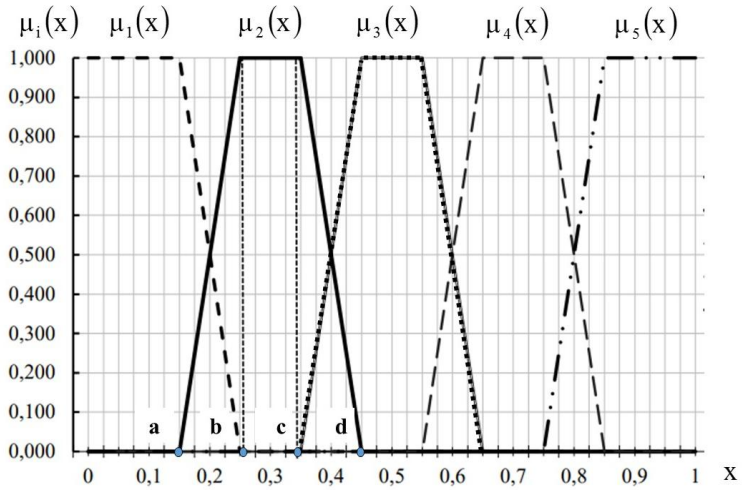


Рис. 3. Система трапецієподібних функцій належності (1–5)

Процес побудови функції належності нечіткої множини здійснюється на підставі експертного оцінювання квазистатистики. В якості квазистатистики експертам запропонована вибірка з табл. 1 з класифікацією відповідно Тимчасового переліку небезпечних і особливо небезпечних технологічних операцій під час розснаряджання і утилізації боєприпасів (НПАОП 29.6-2.01-95).

Перелік операцій під час розбирання ПТКРС 9М14М (табл. 1) представимо як універсальну множину $X = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, $i = \overline{1,n}$, де x_i – відповідна операція за переліком, $n = 19$ – кількість операцій у переліку. Визначається значення функції належності по кожному терму для кожної лінгвістичної змінної: $\mu_{ij}(x_i)$, $i = \overline{1,19}$, $j = \overline{1,5}$.

Для обробки експертної інформації застосовується статистичний метод, що дає можливість дослідити вплив відмов у кожній складовій (технологічній операції) на стан системи S.

Для комплексної оцінки доцільно застосувати метод ранжування [18], який базується на ідеї розподілу міри належності елементів універсальної множини відповідно до їх рангів. Рангом елемента $x_i \in X$ є число $r_i(x_i)$, $i = \overline{1,n}$, яке вказує на важливість цього елемента у формуванні властивості, яка описується нечітким термом. При цьому, вважається, що чим більшим є ранг елемента, тим більшою є міра впевненості у належності елемента нечіткій множині. Для визначення коефіцієнтів пріоритетності частинних факторів використовуємо метод Фішберна [19].

За результатами експертного оцінювання визначені наступні ранги пріоритетності:

$$\begin{aligned} &r_6 = r_9 = r_{10} = r_{11} = r_{12} = r_{15} > r_2 = r_7 = r_8 = r_{14} > r_3 = \\ &= r_5 = r_{13} = r_{18} > r_1 = r_{16} > r_{17} > r_4 > r_{19}. \end{aligned} \tag{6}$$

Тоді коефіцієнт пріоритетності k_i для і-тої операції буде обчислюватись за формулою:

$$k_i = \frac{2 \cdot (m + 1 - p_i)}{m \cdot (m+1)}, \tag{7}$$

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

де m – кількість ключових показників; p_i – номер і-го показника в порядку його важливості.

Для кожного однакового за змістом терму матимемо зважені з коефіцієнтами пріоритетності оцінки:

$$X_j = \sum_{i=1}^{19} k_i \cdot \mu_{ij} . \quad (8)$$

Оцінку узагальненого адитивного показника ризику знаходимо за адитивною згорткою:

$$K = \sum_{j=1}^{n} X_j \cdot T_{\alpha j} , \quad (9)$$

де $T_{\alpha j}$ – середина α-зрізу нечіткого терму лінгвістичної змінної ($T_{\alpha 1} = 0{,}1$; $T_{\alpha 2} = 0{,}3$; $T_{\alpha 3} = 0{,}5$; $T_{\alpha 4} = 0{,}7$; $T_{\alpha 5} = 0{,}9$).

Результати обробки експертних висновків представлені у табл. 2.

Табл. 2. Результати обробки експертних висновків

ЛЗ, x_i	Функція належності, $\mu_{ij}(x_i)$				
	терми				
	ДН ⟨0;0;0,15;0,25⟩	Н ⟨0,15;0,25;0,35;0,45⟩	С ⟨0,35;0,45;0,55;0,65⟩	В ⟨0,55;0,65;0,75;0,85⟩	ДВ ⟨0,75;0,85;1;1⟩
x_1	0	0	1	0	0
x_2	0	0	1	0	0
x_3	0	0	1	0	0
x_4	0	1	0	0	0
x_5	0	0	0	1	0
x_6	0	0	0	0	1
x_7	0	0	0	1	0
x_8	0	0	0	0	1
x_9	0	0	0	0	1
x_{10}	0	0	0	0	1
x_{11}	0	0	0	1	0
x_{12}	0	0	0	0	1
x_{13}	0	0	1	0	0
x_{14}	0	0	1	0	0
x_{15}	0	0	0	0	1
x_{16}	0	1	0	0	0
x_{17}	1	0	0	0	0
x_{18}	0	1	0	0	0
x_{19}	1	0	0	0	0
x_j	0,02	0,07	0,15	0,2	0,5
K	0,68				

Значення узагальненого адитивного показника ризику $K = 0{,}68$ відповідає терму T_4 (високий) з $\mu_4(x) = 1$. При чому, можна стверджувати, що отримані результати будуть характеризувати процес утилізації в так званому ідеальному середо-

вищі, де кожній характеристиці x_i відповідає одиничний ступінь належності. Коефіцієнт реального середовища буде визначатися ступенем відхилення його від ідеального середовища, яке задається множиною X. Значення функцій належності реального середовища визначаються експертами з урахуванням організації технологічного процесу на базі конкретних виробничих об'єктів.

8. Обговорення результатів обробки експертно-лінгвістичної інформації під час оцінки ризиків

Отримані результати пояснюються необхідністю удосконалити національну систему утилізації боєприпасів шляхом впровадження нової технологій утилізації протитанкових керованих реактивних снарядів, яка, на відміну від існуючої, не передбачає спалювання та відкритої детонації.

Особливістю запропонованого технологічного процесу утилізації є представлення його як багатоетапну операцію в ході якої забезпечується раціональне вилучення всіх необхідних компонентів для подальшого використання у новій якості. При цьому для реалізації існуючої моделі управління ризиками під час впровадження такої технології запропонований спосіб обробки результатів експертного оцінювання ризику оснований на застосуванні методів теорії нечітких множин. Це забезпечує перехід від якісних до кількісних показників під час обробки результатів експертних оцінок. Крім того, введення значення узагальненого адитивного показника ризику, дає можливість ввести критерії для оцінювання ризику в реальному середовищі конкретного виробництва.

Даний підхід розглянуто в межах моделі управління ризиками, яка передбачає застосування методу марківського аналізування за концепцією «станів» («готовність», «відмова»). Реалізація його передбачає, що в процесі оцінювання ризиків під час виникнення аварії (відмови) при відповідній інтенсивності потоку подій, за окремими характеристиками чи всієї системи в цілому можна зробити висновок чи буде переходити система із одного стану в інший, а розв'язання рівняння Колгоморова дає значення фінальних ймовірностей такого переходу. При чому, за відсутності чисельних значень, їх можна задати відповідними функціями належності отриманими під час аналізу ризику виникнення аварії.

Разом з тим, застосування методів марківського аналізування та теорії нечітких множин обумовлює певні обмеження та припущення.

Так, застосування нечітких описів має базуватись на наступних правилах:

– моделі таких систем описуються набором кількісних і якісних факторів, які викликають ризики загальним числом N, всі фактори повинні бути вимірними;

– експерту необхідно зафіксувати показник (фактор) ризику і його кількісний носій. На вибраному носії експертом будується лінгвістична змінна зі своєю терм-множиною значень а саме: змінна «Рівень показника Х» може мати терм-множину значень ризиків: «Дуже низький, «Низький», «Середній», «Високий», «Дуже високий»;

– кожному значенню лінгвістичної змінної (яке, за своєю побудовою, є нечіткою підмножиною значень інтервалу (0,1) області значень показника ризику) зіставляється функція належності рівня ризику тій чи іншій нечіткій підмножині.

Застосуванням методу марківського аналізування обумовлюються припущення щодо постійних ймовірностей змінення стану, що усі події статистично незалежні; необхідність чіткого розуміння можливих переходів стану, знання операцій з матрицями тощо.

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

Для обробки отриманих результатів доцільно застосовувати програмні апарати середовищ Microsoft Office Excel та Mathcad. Апробацію в натуральних (лабораторних) умовах та впровадження результатів дослідження доцільно провести на спеціальних виробничих майданчиках. Саме натуральні дослідження мають дати розвиток даного дослідження та відповісти на питання як існуючі недоліки можуть бути усунуті в перспективі.

Результати дослідження можуть бути реалізовані як виконавцями робіт з утилізації, так і відповідними органами державного нагляду у сфері техногенної та пожежної безпеки в процесі проведення експертизи утилізації боєприпасів і вибухівки під час здійснення заходів контролю, погодження нормативних та інших документів з питань утилізації.

Робота є продовженням циклу досліджень направлених на розроблення та впровадження нових високоефективних технологій утилізації боєприпасів.

9. Висновки

1. Для забезпечення високого рівня техногенної та екологічної безпеки під час утилізації боєприпасів запропонований набір і послідовність операцій з розрядження протитанкових керованих реактивні снарядів. При цьому забезпечується раціональне вилучення всіх необхідних компонентів для подальшого використання у новій якості. Орієнтована продуктивність розрядження одного виробу ПТКРС 9М14М – 360,0 осіб/год. Економічна ефективність запропонованої технології може бути розрахована на підставі аналізу кошторисних калькуляцій з урахуванням особливостей конкретного підприємства, що має ліцензію на проведення таких робіт.

2. Для підвищення ефективності процесу управління технологічним ризиком під час впровадження відповідної технології запропонований спосіб обробки експертно-лінгвістичної інформації під час кількісної оцінки прийнятих рішень щодо мінімізації ризиків, який базується на застосуванні методів теорії нечітких множин. Даний спосіб розглянуто в межах моделі управління ризиками, яка передбачає застосування методу марківського аналізування за концепцією «станів» («готовність», «відмова»). Це дає можливість під час експертного оцінювання ризику обробити результати методами формальної логіки.

Література

1. International ammunition technical guideline. IATG 10.10:2021 [E]. Demilitarization, destruction and logistic disposal of conventional ammunition. UNODA, 2021. 40 p. URL: https://data.unsaferguard.org/iatg/en/IATG-10.10-Demilitarization-destruction-logistic-disposal-IATG-V.3.pdf

2. Bagley W. Disposal of Insensitive Munitions. DSIAC Journal. 2019. Vol. 6. № 3. P. 5–9. URL: https://dsiac.org/journals/summer-2019-volume-6-number-3/

3. Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2019. 132 p. doi: 10.17226/25140

4. Danssaert P., Wood B. Surplus and Illegal Small Arms, Light Weapons and their Ammunition: the consequences of failing to dispose and safely destroy them, 2020. 20 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/341767347_Surplus_and_Illegal_Small_Arms_Light_Weapons_and_their_Ammunition_the_consequences_of_failing_to_dispose_and_safely_destroy_them

5. Disposal D. An Introduction to Mobile and Transportable Industrial Ammunition Demilitarization Equipment. RASR Issue Brief. 2013. № 3. P. 1–16. URL:

https://www.smallarmssurvey.org/sites/default/files/resources/SAS-RASR-IB3-Dynamic-Disposal.pdf

6. Ferreira C., Ribeiro J., Clift R., Freire F. A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. Sustainability. 2019. 11. 255p. doi: 10.3390/su11010255

7. Carapic J., Deschambault E. J., Holtom P., King B. Life-Cycle Management of Ammunition: Safety, Security, and Sustainability. The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2018. Vol. 22. Isse 2. Article 2. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss2/2

8. Неклонський І. М., Смирнов О. М. Оптимізація технології випалювання трасерів із артилерійських снарядів малих калібрів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2(36). С. 349–362. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-25

9. Неклонський І. М., Смирнов О. М. Модель управління технологічними ризиками при впровадженні технології утилізації кумулятивних боєприпасів. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. № 27. С. 73–84. URL: https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol27/neklonskiy.pdf

10. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Fifth Edition. Project Management Institute, USA, 2013. 616 p. URL: https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/PMBOKGuide_5th_Ed.pdf

11. A structured approach to Enterprise Risk Management (ERM) and the requirements of ISO 31000. AIRMIC, Alarm, IRM, 2010. 18 p. URL: https://www.ferma.eu/app/uploads/2011/10/a-structured-approach-to-erm.pdf

12. Arunraj N. S., Saptarshi M., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation. Accident Analysis & Prevention. 2013. Vol. 55. P. 242–255. doi: 10.1016/j.aap.2013.03.007

13. Mockor J., Hýnar D. On Unification of Methods in Theories of Fuzzy Sets, Hesitant Fuzzy Set, Fuzzy Soft Sets and Intuitionistic Fuzzy Sets. Mathematics, 2021. 9. 447 p. doi: 10.3390/math9040447

14. Gavrysh O., Melnykova V. Project risk management of the construction industry enterprises based on fuzzy set theory. Problems and Perspectives in Management. 2019. 17(4). 203–213. doi: 10.21511/ppm.17(4).2019.17

15. Cagliano A. C., Grimaldi S., Rafele C. Choosing project risk management techniques. A theoretical framework. Journal of Risk Research. 2015. Vol. 18. Isse 2. P. 232–248. 10.1080/13669877.2014.896398

16. Shahbazi N., Lin Y., Asude A., Jagadish H. V. Representation Bias in Data: A Survey on Identification and Resolution Techniques. ACM Computing Surveys. 2023. Vol. 55. Isse 13. Art. 293. P. 1–39. doi: 10.1145/3588433

17. Illiashenko S., Illiashenko N., Shypulina Yu., Raiko D., Bozhkova V. Approach to Assessment of Prerequisites for Implementation of Strategic Directions of Innovative Development of Industrial Enterprises (June 30, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. 3(13(111)). P. 31–46. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233520

18. Venkata R. R., Lakshmi J. R-method: A simple ranking method for multi-attribute decision-making in the industrial environment. Journal of Project Management. 2021. P. 223–230. doi: 10.5267/j.jpm.2021.5.001

19. Sepeta V. Evaluation of the level of the competitiveness and labor potential of industrial enterprises by means of the integral indicator. Green, Blue and Digital Economy Journal. 2021. Vol. 2. № 1. P. 82–89. doi: 10.30525/2661-5169/2021-1-12

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

I. Neklonskyi, *PhD, Lecturer of the Department*
O. Smyrnov, *Senior Lecturer of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

RISK-BASED APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF THE TECHNOLOGY OF THE DISPOSAL OF ANTI-TANK REACTIVE PROJECTILE

To ensure a high level of man-made and environmental safety during the disposal of ammunition, a set and sequence of operations for discharging anti-tank guided missiles is proposed. At the same time, rational extraction of all necessary components is ensured for further use in new quality. In order to increase the efficiency of the technological risk management process during the implementation of the relevant technology, a method of processing expert-linguistic information during the quantitative assessment of the decisions made regarding risk minimization is proposed. The method is based on the application of fuzzy set theory methods. The implementation of this method involves the description of the subsets of the term set by a system of five corresponding functions belonging to the trapezoidal form with respect to the nodal points, followed by solving the problem by means of fuzzy set theory. A statistical method is used to process expert information. This makes it possible to investigate the impact of failures in each component (technological operation) on the state of the system. For comprehensive assessment, the ranking method is used, which is based on the idea of distributing the degree of belonging of the elements of the universal set according to their ranks. The Fishburne method was used to determine the priority coefficients of partial factors. The value of the generalized additive risk indicator was obtained, which will characterize the disposal process in the so-called ideal environment. It is assumed that the risk of an accident in a real environment will be assessed by the degree of deviation from the ideal environment. This approach is considered within the framework of the risk management model, which involves the application of the Markov analysis method based on the concept of "states" ("readiness", "failure"). This makes it possible to process the results using formal logic methods during expert risk assessment. The work is a continuation of the cycle of research aimed at the development and implementation of new highly effective technologies for the disposal of ammunition.

Keywords: ammunition, disposal, technology, management model, risk, fuzzy set, matrix

References

1. International ammunition technical guideline. IATG 10.10:2021 [E]. Demilitarization, destruction and logistic disposal of conventional ammunition. (2021). UNODA. Available at: https://data.unsaferguard.org/iatg/en/IATG-10.10-Demilitarization-destruction-logistic-disposal-IATG-V.3.pdf

2. Bagley, W. (2019). Disposal of Insensitive Munitions. DSIAC Journal, 6, 3, 5–9. Available at: https://dsiac.org/journals/summer-2019-volume-6-number-3/

3. Alternatives for the Demilitarization of Conventional Munitions. (2019). National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, The National Academies Press. doi: 10.17226/25140

4. Danssaert, P., Wood, B. (2020). Surplus and Illegal Small Arms, Light Weapons and their Ammunition: the consequences of failing to dispose and safely destroy them. Available at: https://www.researchgate.net/publication/341767347_Surplus_and_Illegal_Small_Arms_Light_Weapons_and_their_Ammunition_the_consequences_of_failing_to_dispose_and_safely_destroy_them

5. Disposal, D. An Introduction to Mobile and Transportable Industrial Ammunition Demilitarization Equipment. (2013). RASR Issue Brief, 3, 1–16. Available at: https://www.smallarmssurvey.org/sites/default/files/resources/SAS-RASR-IB3-Dynamic-Disposal.pdf

6. Ferreira, C., Ribeiro, J., Clift, R., Freire, F. (2019). A Circular Economy Approach to Military Munitions: Valorization of Energetic Material from Ammunition Disposal through Incorporation in Civil Explosives. Sustainability, 11, 255. doi: 10.3390/su11010255

7. Carapic, J., Deschambault, E. J., Holtom, P., King, B. (2018). Life-Cycle Management of Ammunition: Safety, Security, and Sustainability. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 22, 2, 2. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss2/2

8. Neklonskyi, I. M., Smyrnov, O. M. (2022). Optimization of the technology of firing tracers from small-caliber artillery shells. Problems of emergency situations, 2(36), 349–362. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-25

9. Neklonskyi, I. M., Smyrnov, O. M. (2018). The model of technological risk management during the implementation of the technology of disposal of cumulative ammunition. Problems of emergency situations, 27, 73–84. Available at: https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfEmergencies/vol27/neklonskiy.pdf

10. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). Fifth Edition. (2013). Project Management Institute, USA. Available at: https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/PMBOKGuide_5th_Ed.pdf

11. A structured approach to Enterprise Risk Management (ERM) and the requirements of ISO 31000. (2010). AIRMIC, Alarm, IRM. Available at: https://www.ferma.eu/app/uploads/2011/10/a-structured-approach-to-erm.pdf

12. Arunraj, N. S., Saptarshi, M., Maiti., J. (2013). Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation, Accident Analysis & Prevention, 55, 242–255. doi: 10.1016/j.aap.2013.03.007

13. Mockor, J., Hýnar, D. (2021). On Unification of Methods in Theories of Fuzzy Sets, Hesitant Fuzzy Set, Fuzzy Soft Sets and Intuitionistic Fuzzy Sets. Mathematics, 9, 447. doi: 10.3390/math9040447

14. Gavrysh, O., Melnykova, V. (2019). Project risk management of the construction industry enterprises based on fuzzy set theory. Problems and Perspectives in Management, 17(4), 203–213. doi: 10.21511/ppm.17(4).2019.17

15. Cagliano, A. C., Grimaldi, S., Rafele, C. (2015). Choosing project risk management techniques. A theoretical framework. Journal of Risk Research, 18, 2, 232–248. doi: 10.1080/13669877.2014.896398

16. Shahbazi, N., Lin, Y., Asude, A., Jagadish, H. V. (2023). Representation Bias in Data: A Survey on Identification and Resolution Techniques. ACM Computing Surveys, 55, 13, 293, 1–39. doi: 10.1145/3588433

17. Illiashenko, S., Illiashenko, N., Shypulina, Y., Raiko, D., Bozhkova, V. (2021). Approach to Assessment of Prerequisites for Implementation of Strategic Directions of Innovative Development of Industrial Enterprises (June 30, 2021). Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3(13(111)), 31–46. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233520

18. Venkata, R., Lakshmi, J. (2021). R-method: A simple ranking method for multi-attribute decision-making in the industrial environment. Journal of Project Management, 223–230. doi: 10.5267/j.jpm.2021.5.001

19. Sepeta, V. (2021). Evaluation of the level of the competitiveness and labor potential of industrial enterprises by means of the integral indicator. Green, Blue & Digital Economy Journal, 2, 1, 82–89. doi: 10.30525/2661-5169/2021-1-12

Надійшла до редколегії: 04.03.2024
Прийнята до друку: 10.04.2024

© І. М. Неклонський, О. М. Смирнов

УДК 623.454.38

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

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ З ПОВЕРХНЕЮ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОЇ РЕЧОВИНИ

Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону, довільно падаючої на поверхню вибухонебезпечної речовини, як найпростішого безоболонкового вибухонебезпечного предмету. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами. Модель дозволяє чисельно оцінювати здатність вибухонебезпечних речовин відбивати та локалізовувати енергію електромагнітних хвиль. Визначальними параметрами для цього є кут падіння електромагнітної хвилі та параметри вибухонебезпечної речовини. Застосування моделі дозволяє розраховувати коефіцієнти відбиття та переломлення потужності електромагнітного поля. Показано, що для реальних вибухових речовин з малими кутами діелектричних втрат цей параметр суттєво не впливає на взаємодію електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Найбільш придатними до дистанційного виявлення шляхом опромінення електромагнітною хвилею є вибухонебезпечні речовини з високим значенням відносної діелектричної проникності. Для вибухонебезпечних речовин з невеликим значенням відносної діелектричної проникності значна кількість електромагнітної енергії переломлюється через поверхню вибухонебезпечної речовини й ця енергія може бути поглинена вибухонебезпечною речовиною. Ступінь поглинання визначається величиною тангенсу кута діелектричних втрат – чим більше тангенс кута діелектричних втрат, тим більше енергії має бути поглинене. Для таких вибухонебезпечних речовин можливим є їх дистанційний підрив шляхом опромінювання електромагнітною хвилею. Вибухонебезпечні речовини з проміжним значенням відносної діелектричної проникності мають середні можливості щодо їх дистанційного виявлення та дистанційного підриву. Таким чином, побудована модель дає можливість оцінювати можливість дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів за допомогою опромінювання їх електромагнітною хвилею.

Ключові слова: вибухонебезпечна речовина, вибухонебезпечний предмет, діелектрична проникність, електродинамічна модель, електромагнітна хвиля, тангенс кута діелектричних втрат

1. Вступ

Останні науково-технічні розробки в оборонній промисловості призвели до збільшення різноманітності і летальності зброї. Мінна зброя має одну з найдавніших історій. Багато століть тому людство вперше почало використовувати енергію вибуху. Негативний вплив вибухонебезпечних речовин (ВР) та осколків оболонок вибухонебезпечних предметів (ВНП) використовується для знищення особового складу, пошкодження та виведення з ладу техніки. Як показує практика, під час військових конфліктів мінна зброя завдає шкоди не лише військовим підрозділам, але й цивільному населенню.

Внаслідок широкомасштабних військових дій за останні 10 років майже третина території України забруднена ВНП (мінами, боєприпасами, що не вибухнули, тощо). Територія, що потребує очищення від ВНП, охоплює понад 185 тис. км². Дороги та населені пункти розміновуються протягом усього року, але їх повне очищення займає багато часу. Аналіз досвіду використання ВНП у регіональних конфліктах і збройних конфліктах показує, що застосування наземних мін має такі особливості Замість довгих мінних полів зазвичай встановлюються невеликі групи мін або окре-

мі міни. Групи мін або окремі міни часто встановлюються без документування. У таких випадках очищення від ВНП вимагає знань і проведення аналізу технічних компонентів ВНП та хімічних властивостей ВР.

Загальні правила безпеки необхідно вдосконалити, щоб полегшити роботу експертів з розмінування і підвищити їхню безпеку. Зрозуміло, що основним джерелом небезпеки від вибухової зброї є ВР, що лежать в її основі [1]. Оскільки вибухи відбуваються в умовах швидкої хімічної реакції, правила безпеки при застосуванні ВР визначаються насамперед їхніми фізико-хімічними властивостями.

Більшість країн світу намагаються розробити власну зброю з використанням ВР. Також різні терористичні організації виготовляють ВНП нелегально. Як наслідок, у світі існує широкий спектр ВНП з різними системами ініціювання. Відповідно існуючи методи пошуку ВНП, які орієнтуються на ВНП з металевими конструкційними елементами, показують низьку ефективність.

Таким чином, проблема недостатньої ефективності методів виявлення вибухонебезпечних предметів з малим вмістом металевих елементів є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Забезпечення безпеки різних об'єктів має особливе значення для будь-якої держави в сучасному світі. Це пов'язано з вирішенням загального завдання сталого розвитку держави й світової цивілізації в цілому. На даному етапі всі розвинені країни світу розробляють технології підвищення безпеки рятувальників [2]. Важливим показником безпеки є оцінка ризику людини в складних ситуаціях [3].

Найбільш ефективним підходом до забезпечення безпеки є передбачення наслідків надзвичайної ситуації [4] та характеру небезпек, з якими можуть зіткнутися рятувальники. Ліквідація наслідків вибуху вимагає величезних фінансових ресурсів і великої кількості персоналу [5]. Незважаючи на технологічний прогрес, розмінування залишається однією з найнебезпечніших сфер для рятувальних команд [6]. Протипіхотні міни є однією з основних причин жертв серед цивільного населення на територіях, що постраждали від конфлікту, і головною перешкодою для післявоєнної реконструкції [7].

Незважаючи на технологічний прогрес, досягнутий західними військовими у сфері розмінування та знешкодження ВНП у XXI столітті, більшість операцій з гуманітарного розмінування базуються на технологіях середини XX століття [8]. Жодна технологія не може виявити всі типи мін у всіх умовах навколишнього середовища. Розробка мультісенсорних систем виявлення необхідна для подолання обмежень окремих датчиків. Для підвищення безпеки рятувальників, які займаються розмінування, слід розробити нові схеми безпечної роботи рятувальників під час поводження з вибуховими речовинами.

За останні роки було розроблено і використовується багато видів ВР. Тому рятувальники повинні мати всебічні знання про ВР. У таких випадках застосовується принцип подібності і ВР класифікуються та оцінюються за схожими параметрами [9]. Однак незважаючи на широке розмаїття конструктивних особливостей боєприпасів, основну небезпеку становить сама ВР [10]. Втім, саме ініціювання вибухової реакції таких матеріалів намагаються запобігти всі рятувальні команди.

Найбільшого розповсюдження на сьогодні набув метод магнітної ідентифікації ВНП [11]. Цей метод використовують усі без винятку піротехнічні команди. Метод простий в технічній реалізації та має високі показники

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

ефективності. Однак крім явних переваг, він має два суттєві недоліки: мала дистанція ефективної дії та орієнтація на металеві конструкційні елементі. Дистанція ефективної дії менше 0,5 метрів призводить до низьких темпів обстеження територій великої площі. Поширення використання ВНП безоболонкового типу чи без металевих конструкційних елементів практично зводить нанівець всі можливості метод магнітної ідентифікації. Тому останніми роками поширилися інші методи виявлення неметалевих ВНП.

Перш за все, до неселективних методів розмінування можна віднести роботизовані комплекси механічного впливу на грунт [12]. Внаслідок жорсткого механічного впливу при використанні таких роботизованих комплексів відбувається підрив ВНП будь-якої конструкції. Однак такий метод також має ряд недоліків, основними з яких є низький тем розмінування, неможливість роботи по поверхні в обмежених умовах [13], неможливість виявлення та знешкодження ВНП глибокого закладання.

В останні роки із розвитком технологій штучного інтелекту розвитку набули методи візуального виявлення ВНП за допомогою камер високої розподільчої здатності, встановлених на безпілотних літальних апаратах (БПЛА), та інтелектуальної системи обробки візуальних даних [14]. Основною перевагою цього методу є швидке обстеження територій великої площі. Однак існуючі інтелектуальні системи обробки зображення поки що є недосконалими, що призводить до низької ефективності виявлення ВНП. Крім того, даний метод має обмеження по пошуку прихованих ВНП.

Усунути ряд перелічених вище недоліків дозволяє метод радіоелектромагнітного сканування [15]. Такий метод має велику дистанцію ідентифікації, що дає змогу використовувати БПЛА, дозволяє виявлення прихованих ВНП без металевих конструкційних елементів. Але взаємодія електромагнітних хвиль з речовиною є складнім фізичним процесом, на який впливає велика кількість факторів. Ці фактори можна розбити на два блоки: параметри електромагнітного поля та параметри ВР. Параметрами електромагнітного поля є потужність, поляризація та частота. Попередні дослідження виявили, що найбільш доцільно для вирішення зазначених питань використовувати електромагнітне випромінювання діапазону 1÷10 ГГц (НВЧ-діапазон) [16]. Основним параметром ВР, що визначає її взаємодію з електромагнітним полем, є її відносна діелектрична проникність. Однак, крім цього параметру, на ефективність використання цього методу впливає кут опромінення електромагнітними хвилями поверхні ВР. Моделі даного класу базуються на розв’язанні рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами. Однак реальних моделей взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнею ВР, як і б враховували всі зазначені вище параметри, не існує.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність моделі взаємодії електромагнітних хвиль з поверхнею вибухонебезпечних речовин при довільному куті їх падіння.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є побудова електродинамічної моделі взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини, як найпростішого варіанту безоболонкового вибухонебезпечного предмету.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Математично описати взаємодію електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону з поверхнею вибухонебезпечної речовини при довільному куті падіння електромагнітної хвилі на цю поверхню.

2. Визначити коефіцієнти відбиття та переломлення електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону при взаємодії з поверхнею вибухонебезпечної речовини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є безоболонкові ВНП із ініціюючими бризантними вибуховими речовинами: як показано в роботі [17], всі ВР можна віднести до діелектриків двох різних класів. Зокрема, ВР гексоген ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$) та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) мають нульовий дипольний момент та нечутливі до електромагнітного випромінювання. Їх можна віднести до ідеальних діелектриків. ВР тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцинату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) мають суттєвий дипольний момент. Відповідно їх слід розглядати як діелектрики з малими втратами (дійсна частина відносної діелектричної проникності $\varepsilon>1$, тангенс кута діелектричних втрат $0<tg\delta_\varepsilon<<1$, дійсна частина відносної магнітної проникності $\mu=1$, тангенс кута магнітних втрат $tg\delta_\mu=0$).

Предметом дослідження є процес взаємодії (падіння, переломлення та відбиття) електромагнітної хвилі з поверхнею ВР для визначення частки енергії електромагнітного поля, що може бути локалізована всередині ВР.

Гіпотезою дослідження є припущення про наявність математичної залежності коефіцієнтів відбиття та поглинання електромагнітних хвиль від поверхні вибухової речовини в залежності від її фізико-хімічних властивостей та кута падіння хвиль. Така залежність дозволить оцінювати ефективність дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів при опромінюванні електромагнітною хвилею.

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

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

5. Математичний опис взаємодії довільно падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечної речовини

Вектор густини потоку енергії електромагнітної хвилі (вектор Пойнтинга) $\dot{\Pi}$ (тут та далі крапка позначає комплексне число) розраховується через напруженості електричного $\dot{E}$ та магнітного $\dot{H}$ полів за формулою [18]:

$$\dot{\Pi} = \frac{1}{2}\cdot[\dot{E}\,\mathrm{x}\,\dot{H}^*], \tag{1}$$

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+\cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\dot{\gamma}z} + \dot{E}^-\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+\cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\dot{\gamma}z} + \dot{H}^-\cdot \mathrm{e}^{\mathrm{i}\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \tag{2}$$

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

$\dot{E}^+$ та $\dot{H}^+$ – амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що проникає крізь речовину та поверхню поділу фаз; $\dot{E}^-$ та $\dot{H}^-$ – амплітуди електричної та магнітної складових електромагнітної хвилі, що відбивається від поверхні поділу фаз; $\mathrm{i}=\sqrt{-1}$ – уявна одиниця; z – координата вздовж осі розповсюдження; $\dot{\gamma}$ – постійна розповсюдження, що визначається як:

$$\dot{\gamma}=\omega\cdot\sqrt{\dot{\varepsilon}\cdot\dot{\mu}}=\mathrm{k}-\mathrm{i}\cdot\alpha, \tag{3}$$

де ω – кутова частота електромагнітної хвилі; $\dot{\varepsilon}=\varepsilon\cdot[1-\mathrm{i}\cdot\mathrm{tg}\delta_\varepsilon]$ – відносна діелектрична проникність ВР; $\dot{\mu}=\mu\cdot[1-\mathrm{i}\cdot\mathrm{tg}\delta_\mu]$ – відносна магнітна проникність ВР; *k* – хвильове число (фазова постійна розповсюдження, що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані); α – коефіцієнт затухання хвилі.

k та α при $\mathrm{tg}\delta_\mu=0$ визначаються за формулами:

$$\begin{aligned} k&=\frac{\omega}{2\cdot\mathrm{c}}\cdot\sqrt{\varepsilon\cdot\mu\cdot(\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\delta_\varepsilon}+1)},\\ \alpha&=\frac{\omega}{2\cdot\mathrm{c}}\cdot\sqrt{\varepsilon\cdot\mu\cdot(\sqrt{1+\mathrm{tg}^2\delta_\varepsilon}-1)}, \end{aligned} \tag{4}$$

де c – швидкість світла.

Розглянемо падіння з повітря електромагнітної хвилі з хвильовим числом k_0 під кутом θ_0 до нормалі z до поверхні ВР з довільними електромагнітними властивостями. Після контакту хвилі з поверхнею частина енергії відбивається у вигляді хвилі з хвильовим числом k_1 під кутом θ_1 до нормалі z. Відповідно до закону Френеля $\theta_0=\theta_1$. Так як всі ВР відносяться до діелектриків з різними діелектричними проникностями ε, то частина енергії електромагнітного випромінювання з хвильовим числом k_0 буде проходити всередину ВР у вигляді електромагнітної хвилі з хвильовим числом k_2 під кутом θ_2 до нормалі z (рис. 1).

Напрямок розповсюдження всіх хвиль знаходиться у площині xz, що відповідає рівності хвильового вектора $\vec{k}_x$ для трьох хвиль:

$$k_0=k_{1\mathrm{x}}=k_{2\mathrm{x}}, \tag{5}$$

де $k_0=\dfrac{\omega}{\mathrm{c}}$.

Проекція хвильових векторів на вісь z при $\mu_1=\mu_2=1$ та куті падіння θ_0 виражається згідно (5) у вигляді:

$$\begin{cases} k_{1\mathrm{z}}=-k_{0\mathrm{z}}=\dfrac{\omega}{\mathrm{c}}\cdot\cos\theta_0\\ \dot{k}_{2\mathrm{z}}=\sqrt{\left(\dfrac{\omega}{\mathrm{c}}\right)^2}\cdot\dot{\varepsilon}-k_{0\mathrm{x}}^2=\dfrac{\omega}{\mathrm{c}}\cdot\sqrt{\dot{\varepsilon}-\sin^2\theta_0}\,. \end{cases} \tag{6}$$

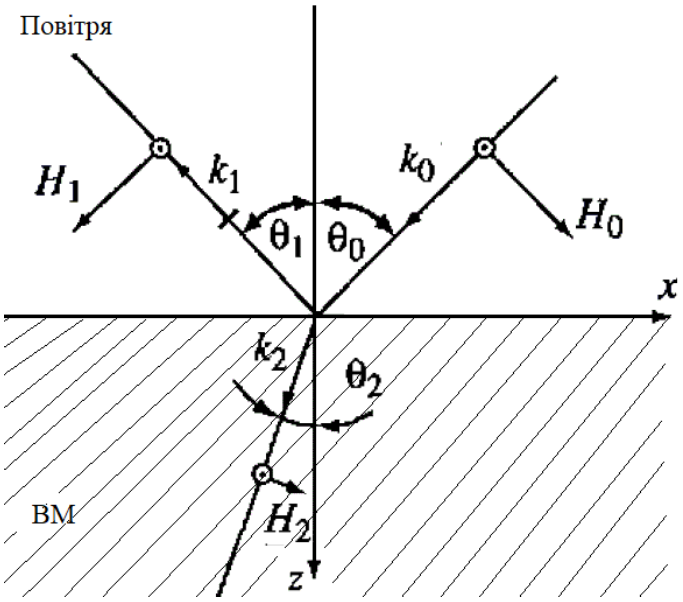


Рис. 1. Падіння електромагнітної хвилі на поверхню ВР

Причому хвильовий вектор k_0 для повітря є дійсною величиною, а хвильовий вектор $\dot{k}_{2z}$ для переломленої ВР є комплексною величиною.

Так як повітря та ВР є діелектриками $(\mu_1 = \mu_2 = 1)$, то отримуємо:

$$\theta_1 = \theta_0, \tag{7}$$

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_0} = \frac{1}{\sqrt{\dot{\varepsilon}}}. \tag{8}$$

При цьому $\sin\theta_2$ є комплексною величиною (ВР є діелектриком з втратами), а $\sin\theta_0$ є дійсною величиною (електромагнітна хвиля падає з повітря). Співвідношення (7) та (8) для кутів падіння θ_0, відбиття θ_1 та переломлення θ_2 відомі з геометричної оптики як закон Снелліуса [18].

Розглянемо два важливі випадки, коли електричне $\vec{E}_0$ поле перпендикулярне площині падіння xz або лежить у цій площині.

Якщо $\vec{E}_0$ перпендикулярно площині падіння (рис. 1), то граничні умови безперервності E_y та H_x приводять до формул Френеля:

$$\dot{E}_1 = \frac{k_{0z} - \dot{k}_{2z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{\cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0}}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0$$

$$\dot{E}_2 = \frac{2 \cdot k_{0z}}{k_{0z} + \dot{k}_{2z}} \cdot E_0 = \frac{2 \cdot \cos\theta_0}{\cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0}} \cdot E_0. \tag{9}$$

Якщо ВР є ідеальним діелектриком, то формули Френеля набувають наступного вигляду:

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

$$E_1 = \frac{\sin(\theta_2 - \theta_0)}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0$$

$$E_2 = \frac{2 \cdot \cos\theta_0 \cdot \sin\theta_2}{\sin(\theta_2 + \theta_0)} \cdot E_0. \qquad (10)$$

При розташуванні вектора $\vec{E}_0$, падаючої хвилі в площині падіння формули Френеля видозмінюються [19]:

$$\dot{H}_1 = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \cos\theta_0 - \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0)}}{\dot{\varepsilon} \cdot \cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0)}} \cdot H_0$$

$$\dot{H}_2 = \frac{2 \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \cos\theta_0}{\dot{\varepsilon} \cdot \cos\theta_0 + \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2\theta_0)}} \cdot H_0, \qquad (11)$$

та для умов прозорості ВР записуються як:

$$H_1 = \frac{\mathrm{tg}(\theta_0 - \theta_2)}{\mathrm{tg}(\theta_0 + \theta_2)} \cdot H_0$$

$$\mathrm{H}_2 = \frac{\sin(2 \cdot \theta_0)}{\sin(\theta_0 + \theta_2) \cdot \cos(\theta_0 - \theta_2)} \cdot H_0. \qquad (12)$$

Отримані вирази (7–12) дозволяють визначати співвідношення відбитої та пройшедшої всередину ВР енергії електромагнітних хвиль.

6. Визначення коефіцієнтів відбиття та переломлення електромагнітної хвилі

Для розв'язання поставленої в роботі мети необхідно отримати моделі для розрахунку коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T електромагнітної хвилі. Ці коефіцієнти є основними при розв'язанні задач пошуку та знешкодження ВНП, тому що здатність ВР до відбиття електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону впливає на ефективність його пошуку електронними методами. Здатність ВР до переломлення й поглинання електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону впливає на ефективність його дистанційного підриву шляхом його нагріву під впливом НВЧ-хвиль.

Коефіцієнт відбиття R визначається, як відношення середнього за часом потоку відбитої енергії до падаючого потоку енергії електромагнітної хвилі:

$$\mathrm{R} = \frac{\left|\vec{E}_1\right|^2}{\left|\vec{E}_0\right|^2}. \qquad (13)$$

При нормальному падінні плоскої хвилі на границю поділу середовищ ($\theta_0 = 0$) обидва випадки поляризації еквівалентні й тому:

$$R = \left| \frac{1 - \sqrt{\dot{\varepsilon}}}{1 + \sqrt{\dot{\varepsilon}}} \right|^2 . \tag{14}$$

Формула (14) справедлива для повітря й для поглинаючого середовища (ВР).

При похилому падінні плоскої хвилі на ідеальний діелектрик ($tg\delta_\varepsilon = tg\delta_\mu = 0$) коефіцієнти відбиття можна визначити на основі (8–13) як:

$$R_\perp = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_0)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_0)}, \tag{15}$$

$$R_{||} = \frac{tg^2(\theta_2 - \theta_0)}{tg^2(\theta_2 + \theta_0)}, \tag{16}$$

де індекс $\perp$ відповідає поляризації хвилі перпендикулярно площині падіння, а індекс $||$ відзначає випадок, коли вектор $\vec{E}_0$ паралельний площині падіння.

Для перевірки працездатності розробленої моделі взаємодії падаючої електромагнітної хвилі з поверхнею ВР проведено розрахунок залежності коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення:

$$T = 1 - R \tag{17}$$

від відносної діелектричної проникності ε та тангенса кута діелектричних втрат $tg\sigma_\varepsilon$ ВР при нормальному падінні електромагнітної хвилі на поверхню ВР ($\theta_0 = 0$).

На рис. 2 приведено залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ (в діапазоні 0÷0,1) ВР, розраховану за формулою (14).

На рис. 3 приведено залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ (в діапазоні 0÷0,1) ВР, розраховану за формулою (14) та (17).

На рис. 2 та рис. 3 додатково нанесено точки – коефіцієнти відбиття R та коефіцієнти переломлення T для найбільш розповсюджених ВР, параметри яких приведено в табл. 1.

Як видно з рис. 2 та рис. 3 величини коефіцієнтів відбиття та переломлення практично не залежать від зміни тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ в обраному діапазону його зміни. Тому на рис. 4 представлена залежність коефіцієнту відбиття R від десяткового логарифму тангенса кута діелектричних втрат $lg(tg\delta_\varepsilon)$ ВР, а на рис. 5 – залежність коефіцієнту переломлення T від $lg(tg\delta_\varepsilon)$ відповідно в більш широкому діапазоні зміни $tg\delta_\varepsilon$.

Табл. 1. Діелектричні властивості деяких ВР

№ з/п	ВР	ε	$tg\delta_\varepsilon$
1	Пентаеритріттетранітрат	3,0	$2 \cdot 10^{-2}$
2	Тринітротолуол	2,9	$3 \cdot 10^{-2}$
3	Нітроглицерін	19,0	$3 \cdot 10^{-3}$
4	Нітрат аммонію	7,1	$7 \cdot 10^{-2}$

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

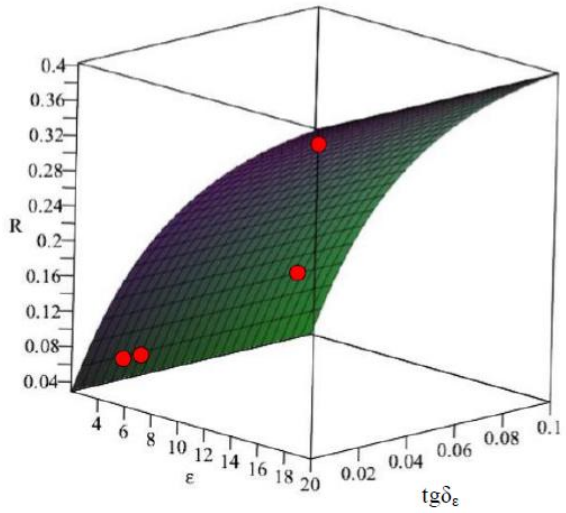


Рис. 2. Залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ (в діапазоні 0÷0,1) ВР

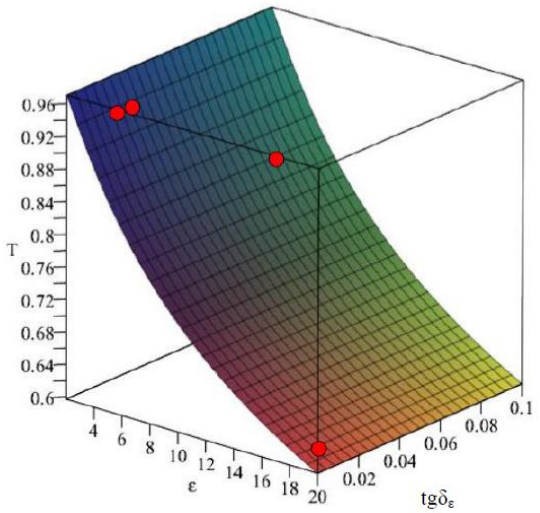


Рис. 3. Залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ (в діапазоні 0÷0,1) ВР

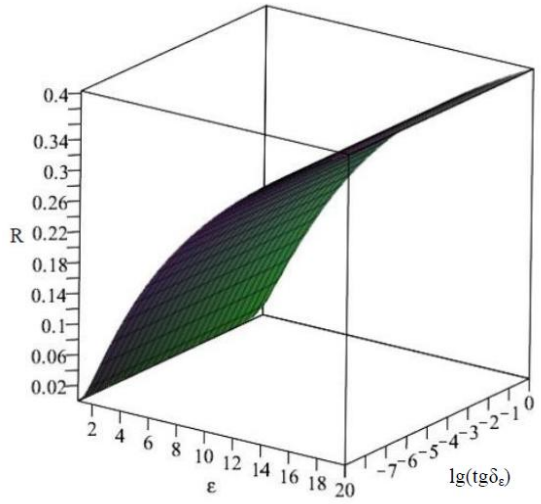


Рис. 4. Залежність коефіцієнту відбиття R від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат $lg(tg\delta_\varepsilon)$ ВР

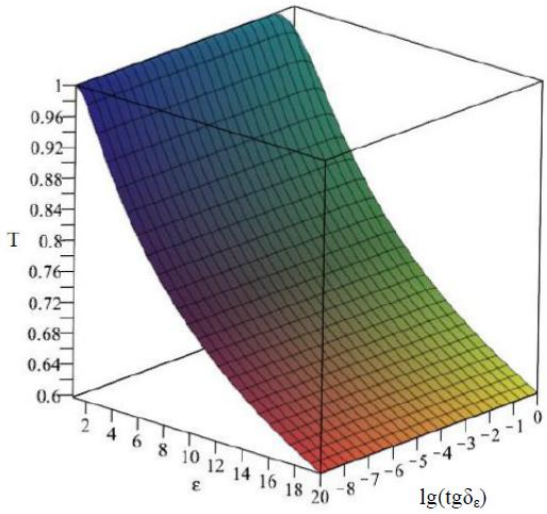


Рис. 5. Залежність коефіцієнту переломлення T від відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) та десяткового логарифма тангенса кута діелектричних втрат $lg(tg\delta_\varepsilon)$ ВР

На рис. 6 приведено залежність коефіцієнту відбиття $R_\perp$ електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) ВР, розраховану за формулою (15).

На рис. 7 приведено залежність коефіцієнту відбиття $R_{||}$ електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε (в діапазоні 1÷20) ВР, розраховану за формулою (16).

7. Обговорення результатів моделювання взаємодії електромагнітної хвилі з поверхнею вибухонебезпечного предмету

Найбільше значення коефіцієнт відбиття R має для ВР «нітроглицерін»,

найменшим – для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол». Це можна пояснити тим, що нітроглицерин маю найбільшу величину відносної діелектричної проникності ε у порівнянні з іншими ВР, що досліджувалися.

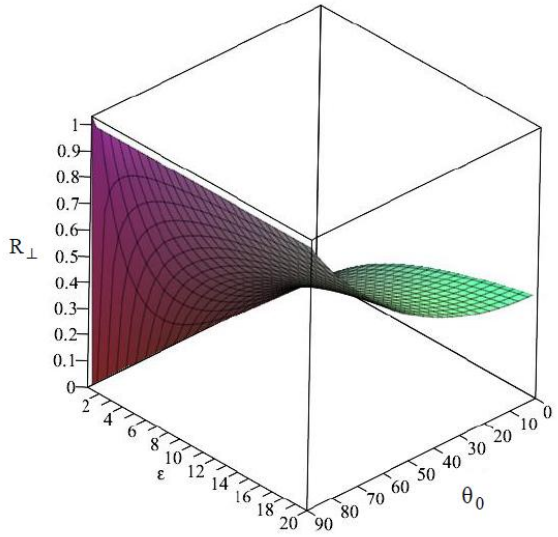


Рис. 6. Залежність коефіцієнту відбиття $R_{\perp}$ електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε ВР

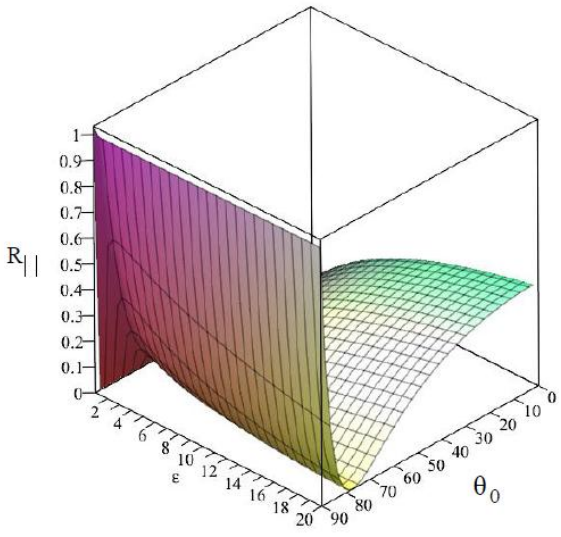


Рис. 7. Залежність коефіцієнту відбиття $R_{||}$ електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кута падіння θ_0 та відносної діелектричної проникності ε ВР

З рис. 2 видно, що при збільшенні величини відносної діелектричної проникності в діапазоні $\varepsilon = 1 \div 20$ при фіксованій величині тангенсу кута діелектричних втрат $tg\delta_{\varepsilon}$ ВМ спостерігається збільшення величини коефіцієнта відбиття R від значення R=0,02 до значення R=0,4 за законом, що є близьким до функції квадратного кореня.

Величина коефіцієнта відбиття R не залежить від кута діелектричних втрат в досліджуємому діапазоні його зміни ($tg\delta_{\varepsilon} = 0 \div 0{,}1$) при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності ε. Відповідно з рис. 3 видно, що при збільшенні величини відносної діелектричної проникності в діапазоні $\varepsilon = 1 \div 20$ при фіксованій величині тангенсу кута діелектричних втрат $tg\delta_{\varepsilon}$ ВМ спостерігається зменшення величини коефіцієнта переломлення T від значення R=0,6 до значення R=0,98 за законом, що є близьким до гіперболічного. Величина коефіцієнта переломлення T не залежить від кута діелектричних втрат в досліджуємому діапазоні його зміни $tg\delta_{\varepsilon} = 0 \div 0{,}1$ при фіксованому значенні величини відносної діелектричної проникності ε. Найбільше значення коефіцієнт переломлення T має для ВР «пентаеритриттетранітрат» та «тринітротолуол», найменше – для ВР «нітроглицерін», що також можна пояснити величиною відносної діелектричної проникності ε ВР.

З аналізу рис. 2 та рис. 3 випливає, що чим більше величина відносної діелектричної проникності ε ВР, тим більше коефіцієнт відбиття R та менше коефіцієнт переломлення T. Тобто чим більше величина відносної діелектричної проникності ε ВР, тим більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається й тим легше визначення місця знаходження ВР.

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

Рис. 4 та рис. 5 було навмисно побудовано для з'ясування впливу зміни в широкому діапазоні величини тангенсу кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ в ВМ на величини коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T. Видно, що в діапазоні $tg\delta_\varepsilon = 10^{-9} \div 1$ зміна тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta_\varepsilon$ суттєво не впливає на величини коефіцієнту відбиття R та коефіцієнту переломлення T. З цього можна зробити припущення, що на локалізацію енергії електромагнітних хвиль всередині ВМ суттєвий вплив може оказати відбиття електромагнітної хвилі від поверхні, на якій знаходиться ВНП.

З рис. 6 та рис. 7 видно, що залежності коефіцієнту відбиття $R_\perp$ електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння та коефіцієнту відбиття $R_{||}$ електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння від кутах падіння θ_0 суттєво відрізняються при всіх кутах падіння θ_0. В усьому діапазоні зміни кута падіння θ_0 крім $\theta_0 = 0$ та $\theta_0 = \pi/2$, $R_\perp > R_{||}$. Коефіцієнт відбиття $R_\perp$ монотонно зростає при збільшенні кута падіння θ_0 в усьому діапазоні змін Ɛ. Коефіцієнт відбиття $R_{||}$ при збільшенні θ_0, спочатку зменшується від 1 до 0 (при $\theta_0 = \text{arctg}\sqrt{\varepsilon}$), а потім починає монотонно зростати.

Слід відмітити, що залежності, приведені на рис. 6 та рис. 7, побудовано у припущенні дійсності величини відносної діелектричної проникності $\dot{\varepsilon}$ ВР (тобто $tg\delta_\varepsilon = 0$ й ВР є середовищем без поглинання). Якщо ВР є середовищем з поглинанням, то $\dot{\varepsilon}$ є комплексною величиною й з формули (8) випливає, що синус кута переломлення $\sin\theta_2$ також має бути комплексною величиною. У цьому випадку коефіцієнт відбиття $\dot{R}_\perp$ електромагнітної хвилі з поляризацією перпендикулярно площині падіння та коефіцієнт відбиття $\dot{R}_{||}$ електромагнітної хвилі з поляризацією паралельно площині падіння (формули (15) та (16)) також стають комплексними величинами. З фізичної точки зору це означає, що амплітуда електромагнітної хвилі має зменшуватися за відповідним законом по мірі проникнення всередину ВР. Електромагнітна хвиля буде не тільки переломлюватися, а й поглинатися ВР, що не враховується в даній роботі однак є суттєво важливим для процесу деактивації вибухонебезпечних предметів. Подальші дослідження слід спрямувати для усунення цього недоліку.

8. Висновки

1. Побудована електродинамічна модель взаємодії електромагнітної хвилі, довільно падаючої на поверхню вибухонебезпечної речовини, як найпростішого безоболонкового вибухонебезпечного предмету. Модель створена шляхом розв'язання рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами. Модель дозволяє чисельно оцінювати здатність вибухонебезпечних речовин відбивати та локалізовувати всередині енергію електромагнітних хвиль НВЧ-діапазону, що падають під довільним кутом на поверхню вибухонебезпечного предмету. В розробленій моделі визначальними параметрами є кут падіння електромагнітної хвилі, відносна діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат вибухонебезпечної речовини. Застосування створеної моделі дозволяє здійснювати розрахунок коефіцієнтів відбиття та переломлення по потужності електромагнітно-

го поля, що дає можливість використовувати отримані чисельні результати безпосередньо для оцінки ефективності дистанційного виявлення та деактивації вибухонебезпечних предметів. Перевагою розробленої моделі є можливість визначення критичних кутів опромінення поверхні вибухової речовини, при яких відбувається повне відбиття електромагнітної хвилі.

2. Отримано формули для розрахунку коефіцієнтів переломлення та відбиття електромагнітної хвилі НВЧ-діапазону при падінні на поверхню вибухонебезпечної речовини, що має властивості діелектрику. Розрахунки показали, що для реальних вибухових речовин з малими кутами діелектричних втрат ($tg\sigma_\varepsilon<0,1$) цей параметр суттєво не впливає на взаємодію електромагнітної хвилі частотою 1÷10 ГГц з поверхнею вибухонебезпечної речовини. Найбільш придатними до дистанційного виявлення шляхом опромінення електромагнітною хвилею є вибухонебезпечні речовини з високим значенням відносної діелектричної проникності. Наприклад, нітрогліцерин (відносна діелектрична проникність 19) відбиває 42 % енергії електромагнітних хвиль та переломлює 58 % енергії відповідно. Для вибухонебезпечних речовин з невеликим значенням відносної діелектричної проникності значна кількість електромагнітної енергії переломлюється через поверхню вибухонебезпечної речовини. Зокрема для пентаеритриттетранітрату (відносна діелектрична проникність 3,0) та тринітротолуолу (відносна діелектрична проникність 2,9) більше 96 % енергії електромагнітної хвилі переломлюється через поверхню й ця енергія може бути поглинена вибухонебезпечною речовиною. Ступінь поглинання визначається величиною тангенсу кута діелектричних втрат – чим більше тангенс кута діелектричних втрат, тим більше енергії має бути поглинене. Для таких вибухонебезпечних речовин можливим є їх дистанційний підрив шляхом опромінювання електромагнітними хвилями НВЧ-діапазону. Вибухонебезпечні речовини з проміжним значенням відносної діелектричної проникності мають середні можливості щодо дистанційного виявлення та дистанційного підриву опроміненням електромагнітною хвилею. Наприклад нітрат амонію (відносна діелектрична проникність 7,1) відбиває 17 % енергії електромагнітної хвилі й переломлює крізь поверхню 83 % енергії відповідно.

Література

1. Kustov M., Karpov A., Harbuz S., Savchenko A. Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. Key Engineering Materials. 2023. Vol. 952. P. 143–154. doi:10.4028/p-0H8UnG

2. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., Meleshchenko R., Danchenko Yu. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4. № 10(100). P. 22–29. doi:10.15587/1729-4061.2019.176579

3. Strategic toolkit for assessing risks: a comprehensive toolkit for all-hazards health emergency risk assessment. World Health Organization, 2021. 71 p. URL: https://www.who.int/publications/i/item/9789240036086

4. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Romin A. Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1. № 10(91). P. 50–55. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419

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

5. Smoliło J., Chmiela A. The mine liquidation processes in SRK S.A. in a cost approach. Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie. 2021. Issue 153. P. 429. doi: 10.29119/1641-3466.2021.153.30

6. Tiutiunyk V., Ivanets H., Tolkunov I., Stetsyuk E. System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. № 1. P. 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7)

7. Ahmed I. Anti-personnel landmines (APLs): A socio-economic and humanitarian perspective. International Journal of Physical and Social Sciences. 2014. Vol. 4. Issue 4. P. 99–112. URL: https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijpss&volume=4&issue=4&article=010

8. Prem M., Purroy M. E., Vargas J. F. Landmines: the Local Effects of Demining. TSE Working Paper. 2022. № 1305. P. 108. URL: https://publications.ut-capitole.fr/id/eprint/44388/1/wp_tse_1305.pdf

9. Behera R., Biswal T., Panda R. B. Recent Progress in Explosives: A Brief Review. Current Advances in Mechanical Engineering. 2021. P. 305–315. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-4795-3_29

10. Zapata F., García-Ruiz C. Chemical classification of explosives. Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2021. Vol. 51. Issue 7. P. 656–673. doi: 10.1080/10408347.2020.1760783

11. Williams D. P., Myers V., Silvious M. S. Mine Classification With Imbalanced Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2009. Vol. 6. Issue 3. P. 528–532. doi: 10.1109/LGRS.2009.2021964

12. Shimoi N., Takita Y. Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot RAT-1. ICCAS 2010. P. 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836

13. Yoo L. S., Lee J. H., Lee Y. K., Jung S. K., Choi Y. Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. Sensors. 2021. Vol. 21(9). 3175. doi: 10.3390/s21093175

14. Ramezani M., Tafazoli S. Using artificial intelligence in mining excavators: automating routine operational decisions. IEEE Industrial Electronics Magazine. 2021. Vol. 15. Issue 1. P. 6–11. doi: 10.1109/MIE.2020.2964053

15. Daniels D. A review of GPR for landmine detection. Sensing and Imaging. 2006. Vol. 7(3). P. 90–123. doi: 10.1007/s11220-006-0024-5

16. Wilson J., Gader P., Lee W., Frigui H., Ho K. A Large-Scale Systematic Evaluation Of Algorithms Using Ground Penetrating Radar For Landmine Detection And Discrimination. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2007. Vol. 45. Issue 8. P. 2560–2572. doi: 10.1109/TGRS.2007.900993

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

18. Landau L. D., Lifshitz E. M. Electrodynamics of continuous media: translated by Sykes J. B., Bell J. S and Kearsley M. J. Pergamon press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 2013. 475 p.

19. Greiner W. Classical Electrodynamics (Classical Theoretical Physics). Springer, Dordreht (Holland), 1998. 566 p.

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

ELECTRODYNAMIC MODEL OF THE INTERACTION OF AN ELECTROMAGNETIC WAVE WITH THE SURFACE OF EXPLOSIVE MATERIAL

An electrodynamic model of the interaction of a microwave electromagnetic wave randomly falling on the surface of an explosive substance as a simple unencased explosive object is constructed. The model was created by solving Maxwell's equations with appropriate boundary conditions. The model allows for a numerical assessment of the ability of explosives to reflect and localise the energy of electromagnetic waves. The determining parameters for this are the angle of falling of the electromagnetic wave and the parameters of the explosive substance. The application of the model makes it possible to calculate the reflection and refraction coefficients of the electromagnetic field power. It has been shown that for real explosives with small dielectric loss angles, this parameter does not significantly affect the interaction of an electromagnetic wave with the surface of an explosive. The most suitable for remote detection by irradiation with an electromagnetic wave are explosives with a high value of relative permittivity. For explosive substances with a low value of the relative permittivity, a significant amount of electromagnetic energy is refracted through the surface of the explosive substance and this energy can be absorbed by the explosive substance. The degree of absorption is determined by the value of the dielectric loss tangent – the greater the dielectric loss tangent, the more energy must be absorbed. For such explosives, it is possible to detonate them remotely by irradiating them with an electromagnetic wave. Explosive substances with intermediate values of relative permittivity have medium possibilities for remote detection and remote detonation by electromagnetic wave irradiation. Thus, the developed model makes it possible to evaluate the possibility of remote detection and deactivation of explosive objects by irradiating them with an electromagnetic wave.

Keywords: dielectric constant, dielectric loss tangent, electrodynamic model**,** electromagnetic wave, explosive object, explosive material

References

1. Kustov, M., Karpov, A., Harbuz, S., Savchenko, A. (2023). Effect of Physical and Chemical Properties of Explosive Materials on the Conditions of their Use. Key Engineering Materials, 952, 143–154. doi:10.4028/p-0H8UnG

2. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Yu. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4, 10(100), 22–29. doi:10.15587/1729-4061.2019.176579

3. Strategic toolkit for assessing risks: a comprehensive toolkit for all-hazards health emergency risk assessment. World Health Organization. 2021, 71. Available at: https://www.who.int/publications/i/item/9789240036086

4. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Romin, A. (2018). Experimental study of the fluctuations of gas medium parameters as early signs of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 10(91), 50–55. doi: 10.15587/1729-4061.2018.122419

5. Smoliło, J., Chmiela, A. (2021). The mine liquidation processes in SRK S.A. in a cost approach. Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie, 153, 429. doi: 10.29119/1641-3466.2021.153.30

6. Tiutiunyk, V., Ivanets, H., Tolkunov, I., Stetsyuk, E. (2018). System approach

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

for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1, 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7)

7. Ahmed, I. (2014). Anti-personnel landmines (APLs): A socio-economic and humanitarian perspective. International Journal of Physical and Social Sciences, 4, 4, 99–112. Available at: https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijpss&volume=4&issue=4&article=010

8. Prem, M., Purroy, M. E., Vargas, J. F. (2022). Landmines: the Local Effects of Demining. TSE Working Paper, 1305, 108 Available at: https://publications.ut-capitole.fr/id/eprint/44388/1/wp_tse_1305.pdf

9. Behera, R., Biswal, T., Panda, R. (2021). Recent Progress in Explosives: A Brief Review. Current Advances in Mechanical Engineering, 305–315. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-4795-3_29

10. Zapata, F., García-Ruiz, C. (2021). Chemical classification of explosives. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 51, 7, 656–673. doi: 10.1080/10408347.2020.1760783

11. Williams, D. P., Myers, V., Silvious, M. S. Mine Classification With Imbalanced Data. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 6, 3, 528–532. doi: 10.1109/LGRS.2009.2021964

12. Shimoi, N., Takita, Y. (2010). Remote mine sensing technology using a mobile wheeled robot RAT-1. ICCAS 2010, 622–626. doi: 10.1109/ICCAS.2010.5669836

13. Yoo, L. S., Lee, J. H., Lee, Y. K., Jung, S. K., Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. Sensors, 21(9), 3175. doi: 10.3390/s21093175

14. Ramezani, M., Tafazoli, S. (2021). Using artificial intelligence in mining excavators: automating routine operational decisions. IEEE Industrial Electronics Magazine, 15, 1, 6–11. doi: 10.1109/MIE.2020.2964053

15. Daniels, D. (2006). A review of GPR for landmine detection. Sensing and Imaging, 7(3), 90–123. doi: 10.1007/s11220-006-0024-5

16. Wilson, J., Gader, P., Lee, W., Frigui, H., Ho, K. (2007). A Large-Scale Systematic Evaluation Of Algorithms Using Ground Penetrating Radar For Landmine Detection And Discrimination. IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 45, 8, 2560–2572. doi: 10.1109/TGRS.2007.900993

17. Kustov, M., Karpov, A. (2023). Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій, 1(37), 4–17. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

18. Landau, L. D., Lifshitz, E. M. (2013). Electrodynamics of continuous media: translated by Sykes J. B., Bell J. S and Kearsley M. J. Pergamon press, Oxford – New York – Toronto – Sydney – Paris – Frankfurt, 475.

19. Greiner, W. (1998). Classical Electrodynamics (Classical Theoretical Physics). Springer, Dordreht (Holland), 566.

Надійшла до редколегії: 04.03.2024
Прийнята до друку: 12.04.2024

УДК 614.8

***В. О. Дурєєв*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-7981-6779)*
***В. В. Христич*[1]**, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID0000-0002-5900-7042)*
***С. М. Бондаренко*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4687-1763)*
***М. В. Маляров*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID ID 0000-0002-4052-7128)*
***М. І. Прокофьєв*[2]**, *д.т.н., проф. каф. (ORCID ID 0000-0001-9388-3735)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*Донецький національний університет ім. Василя Стуса, Вінниця, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ МАГНІТНОКОНТАКТНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА

Розроблено математичну модель магнітноконтактного теплового сповіщувача з урахуванням залежності магнітних властивостей контактів чутливого елементу від структури та типу його контактів. Отримані рівняння для визначення динамічних параметрів сповіщувача, виконано параметричне дослідження характеристик спрацьовування. Проведено аналіз джерел, що дозволив розробити математичні моделі сповіщувачів з детальним урахуванням типової структури матеріалу чутливих елементів з метою отримання динамічних параметрів сповіщувача і визначення оптимальних параметрів його спрацьовування. Модель сповіщувача являє собою сукупність рівнянь, що визначають умови теплообміну з середовищем та ураховують залежність магнітних властивостей контактів чутливого елементу типової структури при зміні температури середовища при нестаціонарному теплообміну. Результатом моделювання роботи сповіщувача є динамічні рівняння у відносних змінних та динамічними параметрами роботи сповіщувача, які дозволяють визначати параметри спрацьовування сповіщувача з урахуванням типової структури контактів чутливого елементу. Рівняння динаміки являють собою класичну позиційну ланку першого порядку та є зручними для проведення досліджень роботи сповіщувача, обчислень динамічних параметрів і проведення параметричних розрахунків параметрів спрацьовування. Розроблені динамічні рівняння для визначення та дослідження динамічних параметрів роботи і спрацьовування магнітноконтактного сповіщувача. Ураховано тип та структуру матеріалу контактів чутливого елементу сповіщувача. Результати порівняльних розрахунків мають відхилення від експериментальних даних до 5 %. Виконане моделювання роботи сповіщувача та отримані рівняння динаміки дозволяють навести практичні рекомендації щодо підбору технічних параметрів для перспективних моделей магнітноконтактних сповіщувачів.

Ключові слова: пожежний сповіщувач, чутливий елемент, математична модель, інерційність, час спрацювання, температура спрацювання

1. Вступ

В сучасних автоматичних системах пожежної сигналізації застосовуються магнітноконтактні теплові сповіщувачі. Чутливим елементом таких сповіщувачів є геркон з контактами, магнітні властивості яких залежать від температури навколишнього середовища. Параметри спрацьовування таких сповіщувачів залежать від динамічних параметрів чутливого елементу, які визначаються структурою матеріалу контактів та процесом їх теплообміну з навколишнім середовищем. Магнітні властивості контактів залежать від типу та структури матеріалу чутливого елементу, а ураховуючи велике різноманіття подібних матеріалів, можуть в значній мірі відрізнятися один від одного в діапазоні робочих температур. Ураховуючи, що паспорт сповіщувача не містить даних про динамічні параметри та не вказує про тип і структуру матеріалу контактів чутливого елементу, дослідження ефективності спрацьовування пожежного сповіщувача стає сильно ускладненим. Ефективність роботи автоматичної системи пожежної сигналізації залежить від ефективності роботи її складових елементів.

Тому відсутність обґрунтованих даних про параметри чутливих елементів та умови теплообміну з навколишнім середовищем магнітноконтактних сповіщувачів є актуальною науковою проблемою.

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

2. Аналіз літератури та постановка проблеми

В [1] представлено фізичні властивості феритів, як матеріалів зі змінними магнітними властивостями. Показані принципи виникнення та механізми зміні магнітного полю, в залежності від структури матеріалу, зміни електричного струму, температури. Наведено рівняння залежності магнітних властивостей феритів від їх параметрів. Показано властивості п'яти основних класів матеріалів по їх магнітним властивостям: діамагнітна кераміка, надпровідні магніти, парамагнітна кераміка, феромагнетики та антиферомагнетики. Показано, що в свою чергу феромагнітні матеріали поділяються на матеріали, структуру яких складає магнітні домени різних типів. Показано, що в залежності від кристалічної структури виділяють тверди та м'які ферити, що впливає на напрям їх намагніченості. Проте не представлені рівняння залежності магнітних властивостей феритів від температури.

В [2] наведено результати експериментальних досліджень поведінки м'яких феритових сердечників, що застосовуються в перетворювачах електричного струму. Досліджувався гістерезис для м'яких феритів в умовах зміни температури. Виявлено, що температурні залежності магнітних властивостей м'яких феритів мають нелінійну залежність від температури. Проте показано, що для діапазону робочих температур від 20 °С до 100 °С лінійні скалярні моделі гістерезису Прейзаха містять похибки, що не перевищують встановлених обмежень. Це задовольняє їх застосування для інженерних розрахунків. Проте в роботі не представлені моделі застосування м'яких феритів у якості чутливих елементів датчиків температури.

В [3] експериментальним чином визначено, що зміна температури фериту має найбільший вплив на його максимальну індукцію. Дослідження проводилися при максимальній намагніченості магнітного поля зразків м'яких феритів. Наведено графічні результати розрахунків магнітної індукції фериту при зміні напруги. Отримано, що індукція приймає максимальне значення при температурі нижче 0°С, а при максимальній температурі досліджень 60 °С індукція досягає мінімального значення, що є слідством хімічного складу фериту (рис. 1).

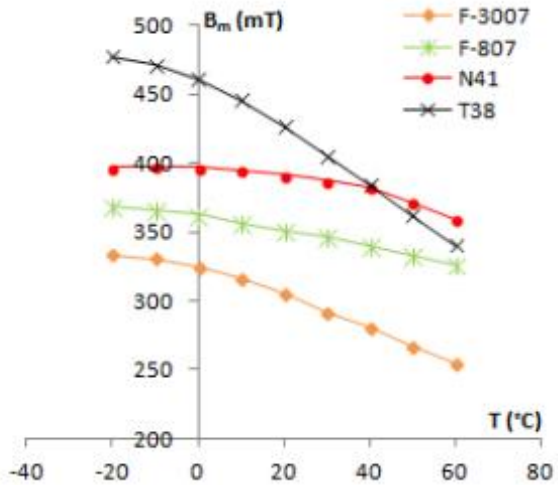


Рис. 1. Залежність максимальної магнітної індукції Bm марганець-цинкових феритів від температури, Hm=120 А/м

Теоретично обґрунтовано механізм втрати магнітних властивостей марганце-цинкового м'якого фериту при високих температурах, що надає саме їм перевагу при застосуванні у якості чутливих елементів в датчиках температури. Пока-

зано, що важливою умовою застосування таких індукційних елементів врахування температурного діапазону роботи. Проте рівнянь для визначення магнітних характеристик м'яких феритів не наведено.

В [4] показано технологію отримання фериту Mn–Zn при різних температурах з заданими магнітними властивостями. Визначено структуру фериту та розмір його кристалічної решітки в межах 8,36÷17,54 нм, що дозволяє отримувати його магнітні властивості наближені до м'яких феритів. Моделюванням та визначенням залежності намагніченості та індуктивності м'яких Mn–Zn феритів від температури автори роботи не займались.

В [5] проводилися роботи з розробки феритів з заданими властивостями. Наведені структурні параметри наночасток феритів з різними типами кристалічної решітки. Проведені дослідження структури та магнітних властивостей феритів при температурах –(160÷130) °С. Показано, що магнітні властивості фериту можуть були представлені у якості функції від температури та зовнішнього магнітного поля. Наведена залежність магнітної індукції від температури. Проте моделювання роботи феритового чутливого елементу не проводилося.

В [6] отримані результати досліджень зразків феритів з різними розмірами часток. Визначено середній розмір структури феритів. Показано, що намагніченість однотипних часток здатна зменшуватися при збільшенні часу помолу. Показано, що температурні залежності намагніченості міняються в залежності від структури фериту та його кристалічної решітки. Моделювання застосування часток феритів для контролю температури в роботі не проводилося.

В [7] представлені графічні результати досліджень магнітних властивостей м'яких Ni–Co–Zn феритів при кімнатній температурі. Показано, що зразки мають типові температурні залежності намагніченості від температури. Теоретично обґрунтовано вплив структури феритів на їх магнітні властивості. Наведено залежності для визначення магнітного моменту, що залежить від молекулярної маси та намагніченості зразків фериту. Наведені чисельні значення коерцитивної сили, температури Кюрі та графічні результати залежності намагніченості зразків м'яких феритів від їх структури та температури. Проте, математичні залежності, що описують представлені результати в роботі не наведені.

В [8] представлено дослідження магнітних властивостей феромагнітного кобальту при зміні температури. Проведено дослідження залежності магнітного моменту та намагніченості від температури. Наведено графічні результати досліджень магнітних властивостей феритів при низьких температурах, та теоретично прояснено вплив структури матеріалу на його властивості. Дослідження залежності магнітних властивостей феритів при робочих температурах пожежних сповіщувачів в не проводилося.

В [9] наводиться теорія магнітного поля феромагнитів, пояснюється процеси різної природи намагнічування, пояснюються зміна магнітних властивостей матеріалів різної структури від температури. Наведені графічні результати досліджень, що пояснюють появлення та зникнення спонтанної намагніченості при зміні температури, навколо температури Кюрі, з формулами її визначення. Також наведено залежності впливу маси зразків феритів на зміну їх магнітних властивостей.

В [10] представлені результати математичних досліджень магнітних властивостей феритних наночасток від температури. Показано, що намагніченість феромагнітних наночасток описується законом Блоха, в якому магнітні властивості

© В. О. Дуреєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, М. В. Маляров та ін.

матеріалу задаються показником ступеню температури. В роботі були порівняні результати теоретичних розрахунків и даних експерименту, які підтвердили отримані результати. Проте моделювання залежності магнітних властивостей повнорозмірних елементів з фериту в роботі не проводилося.

В [11] представлена методика, згідно якої моделюється робота чутливого елементу магнітноконтактного сповіщувача. З урахуванням моделі теплового балансу та залежності намагніченості контактів від температури, отримується рівняння динаміки, що дозволяє моделювати роботу пожежного сповіщувача в різних умовах. Були отримані рівняння динаміки для умов застосування однодоменних феромагнітних матеріалів, суперпарамагнітних часток при слабкому та сильному магнітних полях та з комплексним урахуванням намагніченості від зовнішнього магнітного поля і температури. Проте в роботі не розглядувалися випадки застосування м'яких феритів, які мають найбільш виражені властивості, що дозволяють використовувати саме їх у якості чутливого елементу теплового магнітноконтактного пожежного сповіщувача.

В [12] наведено методи моделювання роботи елементів автоматичних систем за рахунок застосування математичних додатків VisSim та Maple. Проте для практичного їх застосування потрібні моделі чутливих елементів, що ураховують структуру та залежності, що описують магнітні властивості феритів, для застосування їх у якості чутливих елементів в теплових магнітноконтактних сповіщувачах.

Таким чином, важливою та невирішеною частиною розглянутої проблеми є розробка моделі магнітноконтактного сповіщувача з урахуванням магнітних властивостей матеріалу контактів його чутливого елементу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є моделювання роботи магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача для визначення динаміки його роботи в залежності від типу та структури матеріалу контактів чутливого елемента в діапазоні робочих температур (20÷80) °С.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішення наступних завдань:

– змоделювати роботу пожежного сповіщувача з урахуванням матеріалу чутливого елемента;

– отримати залежності та дослідити вплив динамічних параметрів на роботу сповіщувача.

4. Матеріали та методи досліджень

Об'єкт дослідження – залежність магнітних властивостей феритових контактів пожежного сповіщувача від температури. Предмет дослідження – розробка моделі пожежного сповіщувача для визначення динамічних параметрів його роботи. Гіпотезою є припущення рівномірного розподілу температури контактів чутливого елементу по координаті при тепловому впливі на його магнітні властивості.

Розробка структурно-динамічної моделі пожежного сповіщувача проводилося з застосуванням додатку VisSim [11]. Дослідження температурного впливу на магнітні властивості феритових контактів, визначення математичних залежностей та розрахунки параметрів роботи сповіщувача виконувалося з додатком Maple. Характеристики спрацьовування сповіщувача визначалися при параметричних розрахунках часу спрацьовування, постійної часу і динамічної температури спрацьовування при заданій швидкості зростання температури.

5. Моделювання роботи магнітноконтактного теплового сповіщувача

Значна кількість теплових сповіщувачів, які встановлені на об'єктах різного господарювання, застосовує принцип залежності магнітної індукції від температури. Чутливим елементом таких сповіщувачів є геркон, з запаяними феритовими контактами (сповіщувачі серії СПТМ). Розрахункова схема такого сповіщувача представлена в [11].

Для моделювання роботи такого сповіщувача застосуємо рівняння теплового балансу при нестаціонарному тепловому обміні в контактах та рівняння що ураховують залежність намагніченості контактів чутливого елементу пожежного сповіщувача від температури, з урахуванням типу та структури феритових контактів. Приймаючи умови рівномірного розподілу температури феритових контактів по координаті (критерій Біо<0,1), рівняння теплового балансу має вигляд:

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

де m – маса феритових контактів, кг; С – теплоємність матеріалу феритових контактів, Дж·кг$^{-1}$·К$^{-1}$; τ – час, сек; Т – температура контактів з фериту, К; F – площа поверхні феритових контактів, м^2; α – коефіцієнт конвекційного теплообміну, Вт·м$^{-2}$·К$^{-1}$; $Т_П$ – температура повітря, К.

Для урахування типів та структури феритових контактів, розглянемо варіанти застосування ключових варіантів матеріалів контактів для діапазону робочих температур (20÷80) °С.

Згідно з теорією магнітного полю [9] залежність намагніченості контактів чутливого елементу магнітноконтактного сповіщувача, виконаних з матеріалів з вираженими феритними властивостями має вигляд:

$$M_{Ф} = M_0 \frac{k_B T}{\mu\gamma M} a, \quad (2)$$

де M_O – початкова намагніченість ячійки феромагнітного елементу при нормальній температурі, А/м; k_B – постійна Больцмана, Дж/К; Т – поточна температура, К; μ – магнітна проникність, що характеризується відношенням щільності потоку до характеристики магнітного поля; γ – коефіцієнт молекулярного поля; М – намагніченість насичення, А/м; а – змінна що ураховує структуру феритової решітки контакту, м.

Для матеріалів з вираженими антиферитними властивостями залежність намагніченості контактів чутливого елементу [9]:

$$M_{АФ} = M_{АФ0} H \frac{C}{T}, \quad (3)$$

де $M_{АФ0}$ – початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елементу при нормальній температурі, А/м; Н – характеристика магнітного полю, що діє на контакти, А/м; С – постійна Кюрі, що пов'язує магнітну проникність матеріалу з діючою на нього температурою.

Диференційне рівняння залежності індукованої напруги та магнітної індукції м'якого марганець-цинкового фериту від температури, та результат його інтегрування у вигляді залежності магнітної індукції від температури [3]:

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

$$U_{MZ} = -n_S S_E \frac{dB_{MZ}}{dT}; \quad B_{MZ} = \frac{K_C}{n_S S_E} \int U_{MZ} dT, \tag{4}$$

де U_{MZ} – індукована напруга марганець-цинкового феритового контакту, В; n_S – кількість витків вимірювальної катушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту; S_E – площа поперечного перетину витка катушки, мм^2; B_{MZ} – магнітна індукція марганець-цинкового феритового контакту, мА/с^2; Кс – постійна інтегрування.

Згідно [8] намагніченість феритових контактів з урахуванням закону Блоха:

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

де B_L – фактор Блоха; V_0 – атомний об’єм, м^3; діаметр наночастки фериту D, м.

Для побудови моделі сповіщувача з контактами різної структури, дорівняємо в рівняннях (2÷5) диференціали лівої та правої частин:

$$\frac{dM_Ф}{dT} = k_Ф; \quad k_Ф = M_0 \frac{k_B}{\mu\gamma M} a; \tag{6}$$

$$\frac{dM_{АФ}}{dT} = k_{АФ} \frac{1}{T^2}; \quad k_{АФ} = -M_{АФ0} HC; \tag{7}$$

$$\frac{dB_{MZ}}{dT} = \frac{K_C}{n_S S_E} U_{MZ}; \tag{8}$$

$$\frac{dM_{NB}}{dT} = k_{NB1} \sqrt{T}; \quad k_{NB1} = -1{,}5 M_0 B_L. \tag{9}$$

Таким чином, моделювання роботи магнітноконтактного теплового сповіщувача з контактами різної типової структури проводиться з урахуванням теплового балансу (1) контактів чутливого елементу та залежності магнітних властивостей (6÷9) матеріалу контактів від температури. Дана система рівнянь ураховує вплив типу та структури типових матеріалів контактів чутливого елементу на роботу теплового магнітноконтактного сповіщувача в діапазоні робочих температур (20÷80) °С.

6. Отримання залежностей та дослідження впливу динамічних параметрів на роботу сповіщувача

Для отримання залежностей та дослідження впливу динамічних параметрів магнітноконтактного теплового сповіщувача з контактами типової структури, об’єднаємо рівняння (1) теплового балансу та залежності (6–9) магнітних властивостей контактів від температури.

Для намагніченості матеріалів контактів з вираженими феритними властивостями:

$$Cm \cdot \frac{1}{k_Ф} \cdot \frac{d}{d\tau} dM_Ф + \alpha F \cdot \frac{1}{k_Ф} \cdot dM_Ф = \alpha F \cdot \Delta T_П; \tag{10}$$

$$T_{\Phi}\dot{\overline{m}}+\overline{m}=K_{\Phi}\overline{t_{\Pi}};\quad T_{\Phi}=\frac{Cm}{\alpha F};\quad K_{\Phi}=\frac{k_{\Phi}T_{\Pi 0}}{M_{\Phi 0}},\tag{11}$$

де $M_{\Phi 0}$ – намагніченість матеріалу з вираженими феритними властивостями у вихідній точці, А/м; $T_{\Pi 0}$ – температура повітря у вихідній точці, К; T_{Φ} – інерційність, с; K_{Φ} – коефіцієнт посилення; $\overline{m}$, $\overline{t_{\Pi}}$ – відносні змінні.

Для намагніченості матеріалів контактів з вираженими антиферитними властивостями:

$$Cm\cdot\frac{T^2}{k_{A\Phi}}\cdot\frac{d}{d\tau}dM_{A\Phi}+\alpha F\cdot\frac{T^2}{k_{A\Phi}}\cdot dM_{A\Phi}=\alpha F\cdot\Delta T_{\Pi};\tag{12}$$

$$T_{A\Phi}\dot{\overline{m}}+\overline{m}=K_{A\Phi}\overline{t_{\Pi}};\quad T_{A\Phi}=\frac{Cm}{\alpha F};\quad K_{A\Phi}=\frac{k_{A\Phi}}{T^2}\frac{T_{\Pi 0}}{M_{A\Phi 0}};\tag{13}$$

де $M_{A\Phi 0}$ – намагніченість матеріалу з антиферитними властивостями у вихідній точці, А/м; $T_{A\Phi}$ – інерційність, с; $K_{A\Phi}$ – коефіцієнт посилення.

Для магнітної індукції м’якого марганець-цинкового фериту:

$$Cm\cdot\frac{n_S S_E T^2}{K_C U_{MZ}}\cdot\frac{d}{d\tau}dB_{MZ}+\alpha F\cdot\frac{n_S S_E T^2}{K_C U_{MZ}}\cdot dB_{MZ}=\alpha F\cdot\Delta T_{\Pi};\tag{14}$$

$$T_{MZ}\dot{\overline{m}}+\overline{m}=K_B\overline{t_{\Pi}};\quad T_{MZ}=\frac{Cm}{\alpha F};\quad K_{MZ}=\frac{K_C U_{MZ}}{n_S S_E T^2}\frac{T_{\Pi 0}}{B_{MZ0}};\tag{15}$$

де B_{MZ0} – магнітна індукція м’якого марганець-цинкового фериту у вихідній точці, кг/Ас^2; T_{MZ} – інерційність, с; K_{MZ} – коефіцієнт посилення.

Для намагніченості феритних часток з урахуванням закону Блоха:

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

$$T_{NB}\dot{\overline{m}}+\overline{m}=K_{NB}\overline{t_{\Pi}};\quad T_{NB}=\frac{Cm}{\alpha F};\quad K_{NB}=k_{NB1}\sqrt{T}\frac{T_{\Pi 0}}{M_{NB0}},\tag{17}$$

де M_{NB0} – намагніченість феритних наночасток у вихідній точці, А/м; T_{NB} – інерційність, с; K_{NB} – коефіцієнт посилення.

Ураховуючи отримані динамічні параметри (11, 13, 15, 17) роботи магнітноконтактного сповіщувача з контактами чутливого елементу типової структури, визначимо параметри спрацьовування сповіщувача за методом [11]:

$$T_{СП}=\frac{60\cdot\left(T_{ДИН}-T_{СТАТ}\right)}{\frac{dT}{d\tau}\cdot K_{СП}};\tag{18}$$

© В. О. Дуреєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, М. В. Маляров та ін.

$$T_{ДИН} = \frac{60T_{СТАТ} + K_{СП}T_{СП} \cdot \frac{dT}{d\tau}}{60}; \quad (19)$$

$$\tau_{СПР} = \frac{60 \cdot (T_{СТАТ} - T_0) + T_{СП}\frac{dT}{d\tau}}{\frac{dT}{d\tau}}, \quad (20)$$

де $T_{СП}$ – інерційність сповіщувача, с; $T_{ДИН}$, $T_{СТАТ}$ – динамічна та статична температури спрацювання сповіщувача, К; $\tau_{СПР}$ – час спрацювання, с; $dT/d\tau$ – задана швидкість зростання температури, К/с.

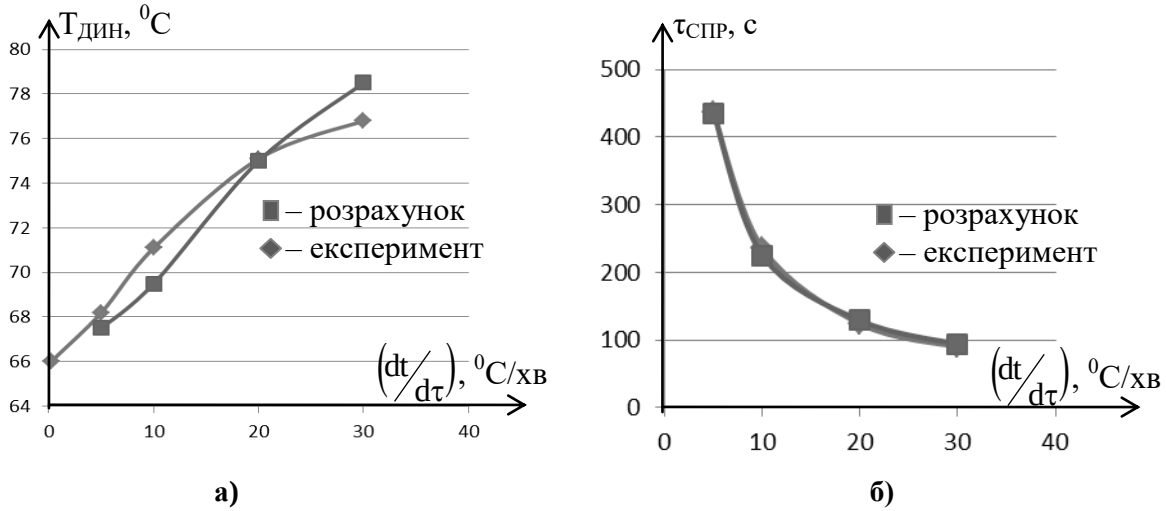
При порівнянні теоретичних розрахунків з даними експерименту, в якості досліджуваного СП застосовано СПТМ-70. Експериментально для СПТМ-70 було визначено статичну $T_{СТ.ЕКСП}$ температуру спрацьовування, динамічну $T_{ДИН.ЕКСП}$ температуру спрацьовування, час $\tau_{СПР}$ спрацьовування, інерційність $T_{СП.ЕКСП}$ (18).

В теоретичних розрахунках з умов визначеної інерційності та заданої швидкості $(dT/d\tau)$ зростання температури, визначалися динамічна $T_{ДИН.РОЗР}$ температура (19) та час $\tau_{СПР\ РОЗР}$ спрацьовування (20) сповіщувача.

Результати усереднених значень отриманих та розрахованих параметрів спрацьовування сповіщувача СПТМ-70 наведені в табл.1, та на рис. 1.

Табл. 1. Динамічні параметри магнітноконтактного теплового СП

$(dT/d\tau)$, К/хв	0,2	5	10	20	30
$T_{СТАТ\ ЕКСП}$, °С	66				
$T_{ДИН\ ЕКСП}$, °С		68,2	71,1	75,1	76,8
$T_{ДИН\ РОЗР}$, °С		67.5	69,5	75	78,5
Відносна погрішність $\overline{\Delta x}T_{ДИН}$, %		1,03	2,25	0,13	2,21
$\tau_{СПР\ ЕКСП}$, с		437	236	124	90
$\tau_{СПР\ РОЗР}$, с		435	225	129	94
Відносна погрішність $\overline{\Delta x}\tau_{СПР}$, %		0,46	4,66	4,03	4,44
$T_{СП\ ЕКСП}$, с	24				



а) **б)**

Рис. 1. Динамічні параметри спрацьовування СПТМ-70 при зміні швидкості зростання температури: а – залежність динамічної температури спрацьовування; б – залежність часу спрацьовування

Таким чином в результаті вирішення поставлених завдань, отримані рівняння, що моделюють роботу магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача з феритовими контактами. Рівняння являють собою динамічні позиційні ланки першого порядку у відносних змінних та ураховують залежність магнітних властивостей контактів типової структури при зміні температури в діапазоні робочих температур (20÷80) °С та їх структуру: намагніченість контактів з вираженими феритними (11) та антиферитними (13) властивостями, магнітну індукцію м'якого марганець-цинкового фериту (15), намагніченість феритних наночасток з урахуванням закону Блоха (17). Отримані рівняння зручні для проведення параметричних досліджень роботи сповіщувачів, а відносна погрішність отриманих за ними результатів не перевищує 5 %.

7. Обговорення результатів дослідження впливу структури контактів на динаміку роботи сповіщувача

Виконано моделювання роботи теплового сповіщувача з феритовими контактами чутливого елементу. Особливістю моделювання є урахування структури типових феритових матеріалів при дослідженні залежності їх магнітних властивостей від температури з застосуванням рівняння теплового балансу.

Особливістю запропонованої моделі магнітноконтактного теплового пожежного сповіщувача полягає в урахуванні характеристик матеріалу та структури контактів чутливого елементу. Модель ураховує наступні типи матеріалів контактів чутливого елементу, що не розглядалися раніше: матеріал контактів з вираженими феритними властивостями, з вираженими антиферитними властивостями, м'який марганець-цинковий ферит, феритні наночастки в умовах урахування закону Блоха. Так у порівнянні з існуючими моделями магнітноконтактного сповіщувача, запропонована модель ураховує: модель для контактів з вираженими феритними властивостями – початкову намагніченість ячійки феромагнітного елементу при нормальній температурі МО, постійну Больцмана k_B, магнітну проникність μ, коефіцієнт молекулярного поля γ, намагніченість насичення М, параметр структури решітки феритового контакту а, поточну температуру Т. Для контактів з вираженими антиферитними властивостями – початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елементу при нормальній температурі $M_{АФ0}$, характеристика магнітного полю, що діє на контакти Н, постійна Кюрі С, поточна температура Т. Моделювання залежності магнітної індукції для контактів з м'якого марганець-цинкового фериту ураховує: індуковану напругу U_{MZ}, кількість витків вимірювальної котушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту n_S, площу поперечного перетину витка котушки S_E, постійну інтегрування Кс, поточну температуру Т. Для феритних наночасток з урахуванням закону Блоха ураховувалися: початкова намагніченість наночастки феритного елементу при нормальній температурі M_O, фактор Блоха B_L, атомний об'єм V_0, діаметр наночастки фериту D, постійна Больцмана k_B, поточна температура Т.

Отримані залежності динамічних параметрів являють собою позиційні ланки першого порядку з відносними змінними та дозволяють визначати параметри спрацьовування теплових магнітноконтактних пожежних сповіщувачів з типовими контактами різної структури. Рівняння ураховують структуру матеріалу контактів чутливого елементу та залежність їх магнітних властивостей від зміні температури зовнішнього середовища. Відносні погрішності розрахованих параметрів спрацьовування сповіщувача СПТМ-70 відрізняються від експериментальних

© В. О. Дуреєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, М. В. Маляров та ін.

даних на величину, що не перевищує 5 %, що пояснюється урахуванням в моделі магнітноконтактного сповіщувача особливостей матеріалу та структури контактів чутливого елементу.

Отримані результати свідчать, що магнітні властивості контактів типової структури залежать від сукупного урахування їх початкової намагніченості та зміни поточної температури. Наведені фактори визначають інерційність та параметри спрацьовування сповіщувача, так як вони оказують вплив на динамічні параметри роботи сповіщувача.

Слід зауважити, що обмеженням застосування розроблених моделей магнітноконтактного сповіщувача є можливість їх використання тільки при відомих чисельних значеннях початкової намагніченості, величини магнітного поля та відомій структурі матеріалу контактів.

Недоліком представлених моделей є те, що вони не ураховують гармонійну зміну зовнішнього магнітного поля, залежність величини магнітного моменту від температури та зміну температури поза робочого діапазону (20÷80) $^{\circ}$C.

Подальшим розвитком запропонованого підходу з побудови математичної моделі магнітноконтактного сповіщувача слід пов’язувати з визначенням параметрів початкової намагніченості, величини та закону зміни зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту в робочому та розширеному діапазоні температур. Таке урахування наведених факторів підвищить точність розрахунків, проте значно ускладнює моделювання роботи сповіщувача за рахунок потреби урахування великої кількості факторів, визначення яких є самою за собою складною задачею. Узагальнення параметрів структури феритових контактів дає більш універсальні результати, проте їх точність може не дозволити проводити параметричні дослідження динамічних параметрів сповіщувачів з контактами складної структури.

Отже, результати моделювання роботи теплового магнітноконтактного пожежного сповіщувача підтверджують вірність прийнятої гіпотези, а розраховані параметрів спрацьовування сповіщувача відповідають експериментальним даним. Таким чином, мета дослідження вважається досягнутою. Результати досліджень дозволяють зробити рекомендації по підбору динамічних параметрів, що покращить параметри спрацьовування перспективних сповіщувачів: статичну та динамічну температури спрацьовування, час спрацьовування.

8. Висновки

1. Розроблені математичні моделі магнітноконтактних теплових пожежних сповіщувачів з контактами чутливих елементів, що мають структуру з вираженими феритними та антиферитними властивостями, м’якого марганець-цинкового фериту та феритових наночасток з урахуванням закону Блоха. Доведено, що для урахування впливу магнітних властивостей контактів чутливого елементу на параметри спрацьовування пожежного сповіщувача , разом з параметрами намагніченості, магнітної індукції, зовнішнього магнітного поля, магнітного моменту та характеристик теплообміну з зовнішнім середовищем, моделювання роботи сповіщувача повинне ураховувати структуру матеріалу контактів. Так в моделі з загальними феритними властивостями структури контактів ураховано 6 параметрів: початкова намагніченість ячійки феромагнітного елементу, постійна Больцмана, магнітна проникність, коефіцієнт молекулярного поля, намагніченість насичення, параметр структури решітки феритового контакту, поточна температура. Модель що описує загальні антиферитні властивості структури контактів ураховує 4 па-

раметри: початкова намагніченість ячійки антиферомагнітного елементу, характеристика магнітного полю, постійна Кюрі, поточна температура. Модель залежності магнітної індукції для контактів з м'якого марганець-цинкового фериту ураховує 5 факторів: індуковану напругу, кількість витків вимірювальної котушки з досліджуваним зразком марганець-цинкового фериту, площу поперечного перетину витка котушки, постійну інтегрування, поточну температуру. Модель зі структурою контактів у вигляді феритних наночасток з урахуванням закону Блоха ураховує 6 факторів: початкова намагніченість наночастки феритного елементу, фактор Блоха, атомний об'єм, постійна Больцмана, діаметр наночастки, поточна температура.

2. Отримані рівняння для визначення та дослідження динамічних параметрів роботи і спрацьовування теплового пожежного магнітноконтактного сповіщувача. Ураховано тип та структуру матеріалу контактів чутливого елементу сповіщувача. Результати порівняльних розрахунків мають відхилення від експериментальних даних до 5 %. В якості рекомендацій покращення динамічних параметрів роботи сповіщувача, доцільно застосовувати тепловий радіатор та збільшити загальну площу чутливого елементу, що поліпшує умови конвективного теплообміну сповіщувача з набігаючим тепловим потоком. В математичних моделях доцільно ураховувати параметри початкової намагніченості, величини та закону зміни зовнішнього магнітного поля і магнітного моменту в робочому та розширеному діапазоні температур, дані структури контактів.

Література

1. Carter C. Barry, Norton M. Grant. Ceramic Materials/ Sciece and Engineering. Springer, 2007. 716 p. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4

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 $La0,7Ca0,3MnO_3$ Nanoparticles. J Supercond Nov Magn 28. 2015. P. 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5

7. Ullah S., Firoz U., Momin A., Hakim M. Effect of V_2O_5 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. Kumar P., Mandal K. Effect of spatial confinement on spin-wave spectrum: Low temperature deviation from Bloch's T3/2 law in Co nanoparticles, 2007. 11 p. doi: 10.48550/arXiv.cond-mat/0701152

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

9. Cullity B. D., Graham C. D. Introduction to Magnetic Materials, Second Edition. Copyright. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2009. 544 p. URL: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/31331/1/B.%20D.%20Cullity.pdf

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. 137с. URL: https://www.yakaboo.ua/modeljuvannja-sistem-u-seredovischi-matlab.html

V. Durieiev*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
V. Khrystych*[1]*, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
S. Bondarenko*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
M. Maliarov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
M. Prokofiev*[2]*, *DSc, Professor, Professor of the Department*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*Donetsk National University named after Vasyl Stus, Vinnytsia, Ukraine*

SIMULATION OF THE WORK OF THE MAGNETIC CONTACT THERMAL FIRE ALARM

A mathematical model of the magnetic contact thermal detector was developed, taking into account the dependence of the magnetic properties of the contacts of the sensitive element on the structure and type of its contacts. Equations for determining the dynamic parameters of the detector were obtained, and a parametric study of the triggering characteristics was performed. An analysis of sources was carried out, which made it possible to develop mathematical models of detectors with detailed consideration of the typical structure of the material of sensitive elements in order to obtain the dynamic parameters of the detector and determine the optimal parameters of its activation. The model of the detector is a set of equations that determine the conditions of heat exchange with the environment and take into account the dependence of the magnetic properties of the contacts of the sensitive element of a typical structure when the temperature of the environment changes during non-stationary heat exchange. The result of modeling the detector's operation is dynamic equations in relative variables and dynamic parameters of the detector's operation, which allow determining the parameters of the detector's operation, taking into account the typical contact structure of the sensitive element. The dynamics equations represent a classical positional link of the first order and are convenient for carrying out studies of detector operation, calculations of dynamic parameters and parametric calculations of actuation parameters. Dynamic equations have been developed to determine and study the dynamic parameters of the magnetic contact detector. The type and structure of the contact material of the sensitive element of the detector is taken into account. The results of comparative calculations deviate from the experimental data by up to 5 %. The performed simulation of the detector and the obtained dynamics equations allow us to provide practical recommendations for the selection of technical parameters for promising models of magnetic contact detectors.

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

References

1. Carter, C. B. (2007). Ceramic Materials: Science and Engineering. Springer, 716. doi: 10.1007/978-0-387-46271-4

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, l, 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: org/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 $La0,7Ca0,3MnO_3$ Nanoparticles. J Supercond Nov Magn, 28, 1051–1054. doi: 10.1007/s10948-014-2869-5

7. Ullah, S., Firoz, U., Momin, A., Hakim, M. (2021). Effect of V_2O_5 addition on the structural and magnetic properties of Ni–Co–Zn ferrites. Published by IOP Publishing Ltd. doi: 10.1088/2053-1591/abd865

8. Kumar, P., Mandal, K. (2007). Effect of spatial confinement on spin-wave spectrum: Low temperature deviation from Bloch's T3/2 law in Co nanoparticles, 11. doi: 10.48550/arXiv.cond-mat/0701152

9. Cullity, B. D., Graham, C. D. (2009). Introduction to Magnetic Materials, Second Edition. Copyright. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 544. Available at: http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/31331/1/B.%20D.%20Cullity.pdf

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: 09.03.2024
Прийнята до друку: 16.04.2024

© В. О. Дуреєв, В. В. Христич, С. М. Бондаренко, М. В. Маляров та ін.

УДК 641.841

***К. М. Остапов*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1275-741X)*
***Ю. М. Сенчихін*[1]**, *к.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0002-5983-2747)*
***В. Г. Аветісян*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-5986-2794)*
***І. К. Кириченко*[2]**, *д.ф-м.н., професор (ORCID 0000-0001-7375-8275)*
***О. П. Тарасенко*[3]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1745-3845)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна*
[3]*Каразінський банківський інститут, Харків, Україна*

УДОСКОНАЛЕННЯ ВІЗКА ПІДВАГОННОГО ГАСІННЯ З РОЗПИЛЮВАЧЕМ ГЕЛЕУТВОРЮЮЧОГО СКЛАДУ

Удосконалено візок підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворючих складів, який дозволяє здійснювати гасіння в обмеженому просторі під вагоном метро за умови забезпечення раціональних параметрів розпилення гелеутворючої суміші. З метою удосконалення спеціального візка підвагонного гасіння пожеж на станціях метро до його конструкції введено універсальний змішувач-розпилювач гелеутворюючого складу. Задля його ефективного використання при пожежогасінні на допоміжному лабораторному устаткуванні відпрацьовано рішення, які забезпечують скорочення часу та витрат гелеутворючої суміші при локалізації і припиненні горіння можливої пожежі. Доведено тактико-технічні переваги підвагонного гасіння пожеж в метрополітені гелеутворюючими системами з використанням універсального змішувач-розпилювача, що є невід'ємною частиною удосконаленого візка вузької колії. Запропоновано раціональні рішення, які скорочують час гасіння пожеж на станціях та зменшують витрати вогнегасних речовин на 10–20 % у порівнянні з іншими, раніше запропонованими пристроями гасіння пожеж під вагонами на станціях метро. Проведено лабораторні експерименти щодо дослідження тактико-технічних характеристик удосконаленого візка з універсальним змішувач-розпилювачем типу «сегнерове колесо», які доводять, що візок здатен гасити ймовірні пожежі в складних умовах під вагонами на станціях метрополітену. Також, в усіх випадках підвагонного гасіння пожеж на станціях метро очікується поліпшення умов проведення аварійно-рятувальних робіт при евакуації людей з приміщень станцій та із вагонів, що зайнялись. Отриманні результати підтверджують підвищення ефективності гасіння у підвагонному просторі розпиленими дрібнодисперсними гелеутворюючими складами зі скороченням часу гасіння та зменшенням витрат вогнегасної речовини за рахунок використання єдиного змішувач-розпилювача гелеутворюючих складів.

Ключові слова: гелеутворючий склад, вогнегасний порошок, метрополітен, вагони метро, візок підвагонного гасіння

1. Вступ

Метрополітен – важлива частина транспортної системи великих міст. В них постійно зростає кількість станцій метрополітену, розширюються мережі ліній, зростають обсяги перевезень пасажирів. Для здійснення перевізного процесу метрополітен має розгалужену мережу підземних споруд з розміщеним в них різноманітним технічним обладнанням [1, 2].

Вітчизняний та світовий досвід експлуатації метрополітенів свідчить про їх високу пожежну небезпеку. Гасіння пожеж у підземних спорудах метрополітену ускладнюється їх сильним задимленням, віддаленістю від поверхні, труднощами в управлінні пожежно-рятувальними підрозділами, необхідністю взаємодії з адміністрацією об'єкта під час проведення евакуації та виконанні організаційно-технічних заходів щодо зняття напруги та димовидалення [3].

У зв'язку з цим особливе значення набувають питання безпеки пасажирів, обслуговуючого персоналу метрополітену та особового складу пожежно-рятувальних підрозділів, які беруть участь у гасінні пожеж [4, 5].

Велику небезпеку мають пожежі у вагонах рухомого складу. Статистичні данні про загоряння й пожежі у метрополітенах України та світу за останні роки свідчать, що найбільш вразливим в пожежному відношенні слід вважати підвагонний простір [6].

Це пов'язано з тим, що під вагонами метро є підвищена ймовірність виникнення пожеж, яка обумовлена насиченістю цього простору складовими класичного трикутника пожежі. Вздовж вагону у великому обсязі розміщено його пожежне навантаження (в перерахунку на площу підлоги вагону у межах 45–50 кг/м^2). Наявність в тунелях і на станціях потужної примусової та природної вентиляції створює умови для швидкого розповсюдження пожежі та задимлення станції метрополітену. Також постійно зберігається висока небезпека від джерел запалювання (механічного та електричного походження) [7].

Крім переліченого, особлива небезпека для людей пов'язана ще з тим, що основна частина матеріалів оздоблювання у метро при горінні виділяє отруйні гази підтримуючи горіння та спроможна розповсюджувати вогонь на інше обладнання [8]. Все це створює труднощі в роботі пожежних-рятувальників, що зайвий раз підтверджує актуальність даного дослідження [9]. Особливу актуальність дана робота набуває в умовах воєнного стану, коли значна кількість наявних шкільних занять молодших класів проводиться у підземних спорудах метрополітену.

Таким чином, проблема складності гасіння пожеж у важкодоступних місцях під вагонами метро є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [10] зазначено, що найбільш потужний і ефективний для гасіння пожеж на залізничному рухомому складі є пожежний потяг. Він має тяговий локомотив, до якого причеплені ємності з запасом вогнегасних речовин (вода, піноутворювач, порошок та ін.) та допоміжні вагони, в яких є потужні насоси, мотопомпи, пожежні рукава, пожежні стволи, вогнегасники й інше пожежно-технічне устаткування (ПТУ). Все це необхідно на випадок гасіння великих пожеж різноманітного характеру.

При одержанні повідомлення про резонансну пожежу пожежний потяг прибуває до об'єкту пожежогасіння по залізничній колії. Бригада електриків знімає напругу з контактної мережі і видає дозвіл на гасіння, а особовий склад пожежних-рятувальників, використовуючи наявне ПТУ, приступає до подавання вогнегасних речовин (ВГР) на осередки пожежі в потрібні й доступні для цього місця. Основними недоліками використання пожежного потягу є досить тривалий час прибуття, висока вартість залучення та обмежена зона використання.

В роботі [11] відмічено, що в метрополітенах з метою гасіння пожеж на станціях метро використовують прості, недорогі візки з пересувними вручну вогнегасниками порошкового типу ВП-50. Тим не менш, за аналогію з залізницею для метро розроблено схожий підхід для обслуговуючого персоналу, де останньому наказано по прибуттю і зупинці електропоїзда, що горить, необхідно спочатку зняти напругу з контактної мережі. Після одержання команди на гасіння, слід дотягти до вагона з пожежею візки з ВП-50. Потім, оператори відчиняють запірні пристрої й спрямовують потік вогнегасного порошку на осередок пожежі, здійснюючи гасіння до припинення горіння, або до повної витрати порошку, яка наступає через 25 с. Складнощі застосування ВП-50 для гасіння у підвагонному просторі створюються в наслідок непередбаченості пожежі, хаотична евакуація

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, І. К. Кириченко та ін.

пасажирів з вагонів заважає налагодженню цілеспрямованих дій обслуговуючому персоналу станції і пожежним-рятувальникам. До того ж, через люки та пройми поміж вагонами дістатися до палаючого обладнання під вагоном не завжди можливо. Тому гасіння такими штатними візками з ВП-50 підвагонного обладнання є не ефективним.

В роботі [12] було створено та частково опрацьовано порівняно ефективний устрій підвагонного гасіння**.** Бажане поліпшення ефективності гасіння вірогідних пожеж на станціях метро під вагонами вирішувалося за рахунок того, що порошкові вогнегасники ВП-5 (в кількості 8 шт.) закріплялися на рамі спеціального візка вертикально. Візок з ними мав рухатися під вагонами всього електропоїзду по середині колії метро в поглибленому дренажному лотку водозбірника станції. Можливості використання такого устрою відпрацьовувалися на умовних пожежах вагонів, що прибували до станції. Експерименти довели, що за рахунок розміщення на візку вогнегасників ВП-5, дистанційного управління рухом візка й задіяння вогнегасників за певною послідовністю (або усіх разом) можна дещо підвищити ефективність підвагонного гасіння пожеж у метро, причому безпечно для пасажирів та інших людей на станції. В такому разі досягається безпосередній контакт ВГР з об’єктами пожежогасіння під вагонами. Дно конкретного вагона спільно з платформою і боковою стіною станції певною мірою сприяють утворенню пів-замкнутого простору, який при гасінні буде заповнюватися вогнегасним порошком (ВГП), підвищуючи об’ємну концентрацію порошково-повітряної суміші, яка буде «огортати» елементи обладнання, які палають під вагоном та сприяти гасінню пожежі. Але, як показали подальші натурні експерименти, ефективність гасіння такими устроями все ж таки недостатня, що б гарантовано стати на заваді пожежі на етапі її виникнення та розвитку до горіння вагонів всього електропоїзду. Недоліки запропонованого способу гасіння обумовленні й тим, що під впливом інтенсивних повітряних потоків на станціях і в підвагонному просторі, частинки вогнегасного порошку будуть зноситися та осаджуватися на основну рейкову колію, суттєво знижуючи ефективність гасіння.

В роботі [13] зроблено крок до підвищення ефективності гасіння пожеж на станціях метро в підвагонному просторі. Було проведено експерименти, в яких замість вогнегасного порошку подавалась на гасіння сучасна гелеутворююча система двокомпонентного складу $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2 + CaCl_2$. Доставку гелеутворюючих складів (ГУС) під відповідний вагон електропоїзду на станції здійснюється за допомогою спеціального візку. На його рамі розміщено горизонтально та закріплено хомутами з замками два балони по 50 л, в які закачано під тиском дві компоненти ГУС. Кожен балон (зі своєю компонентою ГУС) приєднано через запірний пристрій до розпилювача, який розпорошує свою складову ГУС на палаючі елементи обладнання під вагоном метро. Дослідження показали, що недоліком такого візка є окрема подача на об’єкти пожежогасіння компактними струменями компонент ГУС, що не сприяє покриттю усіх елементи обладнання під вагоном рівномірно. Тим самим зменшується ефект адгезії ГУС до палаючих поверхонь. А це, в свою чергу, супроводжується не раціональними витратами ГУС і зменшенням ефективності пожежогасіння.

В роботі [14] проблема підвищення ефективності використання ГУС при гасінні пожеж класу А вирішувалася шляхом удосконалення тактико-технічних можливостей ручного візка установки гасіння гелеутворюючими складами, за рахунок здійснення рівномірного покриття всієї палаючої поверхні, розпиленим

дрібнодисперсним потоком вже змішаних компонент ГУС. Недоліком використання цієї установки є неможливість здійснювати доставку та подачу ручним стволом компонент ГУС на осередки пожежі в обмеженому підвагонному просторі.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є недостатня ефективність розпилення та подачі гелеутворюючих складів до важкодоступних місць під вагонами метро.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворючих складів, який дозволяє здійснювати гасіння в обмеженому просторі під вагоном метро за умови забезпечення раціональних параметрів розпилення гелеутворючих складів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

– розробити проект удосконалення візка підвагонного гасіння з єдиним змішувачем та розпилювачем компонент гелеутворючих складів;

– провести лабораторний експеримент з дослідження запропонованого візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворючих складів при різних способах подачі та параметрах розпилення компонент вогнегасної речовини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є проект удосконалення спеціального візка, а саме – роботи його устаткування з удосконаленням тактико-технічних характеристик, що визнається лабораторними експериментами пожежогасіння елементів обладнання, що розміщене під вагонами метро.

Предметом дослідження є процес пожежогасіння у підвагонному просторі вагона метро, який складається з доставки удосконаленим візком складових компонент ГУС та їх подавання на модельні аналоги палаючого підвагонного обладнання різними способами подачі та параметрами розпилення компонент ГУС.

Гіпотезою дослідження є припущення, що удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворючих складів дозволить здійснювати гасіння в обмеженому просторі під вагоном метро та забезпечить раціональні параметри розпилення гелеутворючих складів.

Дослідження проведено як лабораторний експеримент по гасінню загорянь модельних зразків елементів підвагонного обладнання вагону метро на створеному устаткуванні у вигляді лабораторного стенду, який дозволяє змінювати положення модельного вогнища (фрагменту підлоги вагона), відносно кута подачі ГУС.

Для реалізації лабораторних експериментів загорянь та розвитку пожеж під вагоном метро було виготовлено фрагмент підлоги вагону, який за своїм пожежним навантаженням дорівнює модельному вогнищу 1А.

На рис. 3 наведено комплекс лабораторного оснащення й схеми експериментів щодо підвагонного гасіння пожеж ГУС.

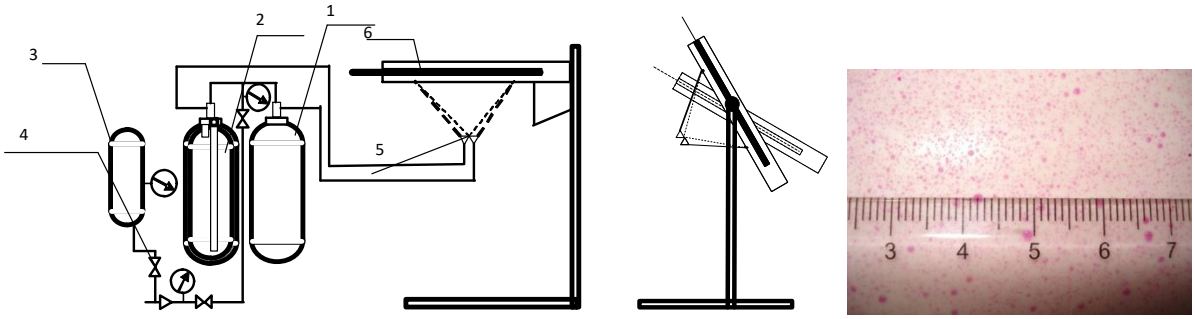
Щоб максимально наблизити умови експерименту до реального гасіння підвагонного простору було використано спеціальний стенд (рис. 3, а), який різними кутами нахилу імітував рух модернізованого візка. Це дозволило досліджувати вплив кута нахилу поверхні пожежогасіння на стійкість адгезії та ефективність гасіння. Завдяки стенду подача вогнегасної речовини здійснювалася на фрагмент підлоги вагона під змінним кутом α. Положення модельного вогнища змінювалось від вертикального (рис. 2, б) до подачі знизу вверх на горизонтально розташовану поверхню підлоги

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, І. К. Кириченко та ін.

вагону (рис. 3, а). Розмір крапель гелеутворюючих складів оцінювався візуально, перед випробуваннями з гасіння, шляхом розгляду під мікроскопом зразка гидрофобного матеріалу з напиленим на його поверхню вогнегасної речовини (рис. 3, в).

а) б)

Рис. 2. Забезпечення експериментів по гасінню модельних вогнищ класу 1А: а – наближений за своїм пожежним навантаженням фрагмент підлоги вагону метро; б – розпалювання модельного вогнища у вигляді фрагменту підлоги вагону



а) б) в)

Рис. 3. Оснащення й схема експериментів на спеціальному стенді: а – схема стендової установки : 1, 2 – ємності з компонентами ГУС, 3 – компресор, 4 – запірний вентиль, 5 – розпилювачі; б – стенд під різними кутами подавання ГУС; в – визначення розміру крапель ГУС

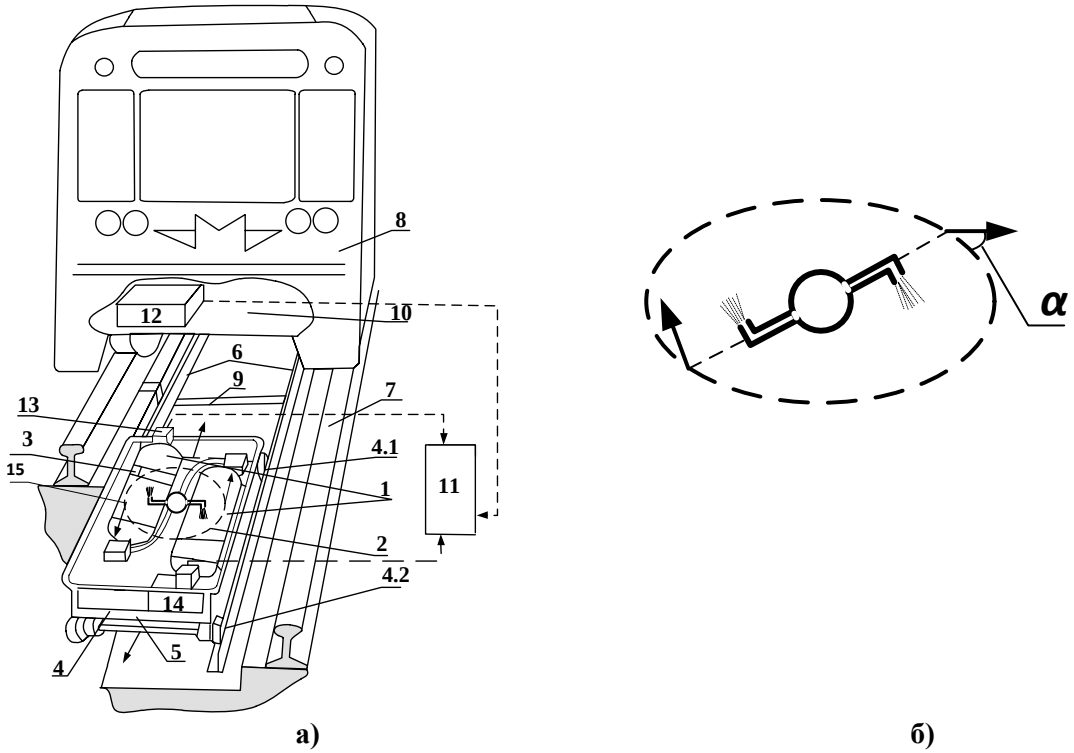
Процедура випробувань мала наступну послідовність. На спеціальній підставці (рис. 2, б) розміщувалось модельне вогнище, під яке вводився піддон, у якому поверх шару води наливалось 1 л бензину. Бензин запалювався. Після повного вигорання (за 3 хв) піддон забирався. Час вільного горіння вибирався рівним 1 хв. Загальний час розпалювання модельного осередку становив 4 хв, після цього розпочиналася подача дрібно розпилених компонент ГУС. Ефективність гасіння характеризував проміжок часу від початку подавання розчину до припинення горіння. Результат вважався позитивним, якщо гасіння тривало до 45 с та коли протягом 600 с після закінчення гасіння, не спостерігалася поява полум’я. Однак, основним критерієм ефективності була маса компонент ГУС витрачених на гасіння, яка напряму залежала від адгезії гелю до поверхні пожежогасіння. Маса вогнегасної речовини, що пішла на гасіння визначалася шляхом зважування установки до початку гасіння та після нього.

Здобуття та опрацювання результатів взаємозв’язаних завдань проекту удосконалення візка для ефективного та безпечного підвагонного гасіння пожеж на станціях метрополітенів, використовувалися методики лабораторного експерименту, що були розроблено нами в роботі [7].

5. Розробка проекту удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів

Щодо шляху доставки двох складових ВГР (гелеутворючої сполуки $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2 + CaCl_2$) до потрібного місця у підвагонному просторі, то тут удосконалення візка доцільно пов'язати з універсальним змішувач-розпилювачем типу «сегнерове колесо», проект якого нами запропоновано.

Він містить: раму вузької колії з двома балонами, що заповнені під тиском двома компонентами ГУС та прикріплені до рами рухомого візка з двома колісними парами, де перша і друга колісні пари приєднані тросом з зачіпками до барабанної лебідки з відповідним приводом «тягни-штовхай». Візок встановлено у колії посередині основної колії руху вагонів метро. Удосконалення візка підвагонного гасіння полягаю у використані змішувача-розпилювача типу «сегнерове колесо» з двома загнутими до гори під кутом (відносно горизонтальної площини візка) кінцевими насадками, які дозволяють змінювати дисперсність крапель та розпилюють компоненти ГУС у вигляді дрібнодисперсного туману рівномірно на усі поверхні підвагонного простору. Завдяки дрібнодисперсному рівномірному розпиленню компонент ГУС вдається рівномірно покрити всі елементи обладнання під вагоном, отримати однаково стійку адгезію на всіх поверхнях пожежогасіння та зменшити втрати ВГР від стікання та осипання. На рис. 4, а наведено схеми до проекту удосконаленого візка вузької колії зі спрощеним блоком керування. Спрощення блоку керування рухом візка вузької колії стає можливим завдяки конструктивному зменшенню кількості балонів з ВГР до 2-х штук (рис. 4,а).



а) **б)**

Рис. 4. Схеми до проекту удосконаленого візка підвагонного гасіння: а –устрій підвагонного гасіння: 1 – балони з компонентами ГУС; 2 – хомути кріплення; 3 – замки кріплення; 4 – візок; 4.1, 4.2 – перша і друга колісні пари; 5 – зчіпка; 6 – вузькоколійна дорога; 7 – основна колія; 8 – вагон метрополітену; 9 – шпала; 10 – тягова лебідка з тросом «тягни-штовхай»; 11 – система управління рухом візка; 12 – система управління рухом вагону, 13 – датчик температури; 14 – тахометр 15 – розпилювач типу «сегнерове колесо»; б – схема роботи змішувач-розпилювача типу «сегнерове колесо»

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, І. К. Кириченко та ін.

Тягова лебідка з барабаном, що закільцьована тросом з зачіпками, задіяна за принципом «тягни-штовхай», забезпечує човниковий рух візка з одночасним розпорошуванням попередньо змішаної рідини ГУС у підвагонний простір. Спрощений блок управління керує рухом візка за аналогією з системою автоматичного регулювання швидкості вагонів. Візок з вогнегасниками зупиняється в залежності від факту досягнення їм осередку пожежі. Про що сигналізують температурний та швидкісний датчики, які встановлені на візку. Всі режими руху візка, включаючи його повернення на вихідне положення для заміни порожніх вогнегасників, заповненими, здійснюється дистанційно.

На рис. 4, б показано, схему роботи універсального змішувач-розпилювача типу «сегнерове колесо». Так, за рахунок реактивного обертання змішувач-розпилювача типу «сегнерове колесо», створюється можливість наповнення підвагонного простору дрібнодисперсним «туманом» ГУС та за рахунок реверсивного зміщення візка («туди-сюди» біля осередку пожежі) шарами покриваються деталі та вузли всього палаючого підвагонного обладнання. Тут α – нахил кінця насадку змішувач-розпилювачу, тобто кут атаки на пожежу.

6. Дослідження параметрів удосконаленого візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів

Спочатку звернемо увагу на тактичний аспект удосконалення візка ефективного та безпечного підвагонного гасіння пожеж під вагонами на станціях метро з розпилювачем типу «сегнерове колесо». Цей аспект вважається одним з основних так, як дає можливість визначити кращій шлях до підвищення ефективності гасіння пожеж гелеутворючим складом $Na_2O \cdot 2{,}95SiO_2 + CaCl_2$ у підвагонному просторі. Тобто тут треба вибрати ту альтернативу, яка дає можливість підвищити ефективність гасіння під вагоном. Одним з параметрів дослідження удосконаленого візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів було порівняння двох різних способів подачі ГУС на гасіння. А саме:

– подавання складових ГУС на гасіння підвагонного обладнання здійснювалося двома окремими розпилювачами (кожна складова з компонент ГУС окремо, змішування компонент ГУС відбувалось на поверхні умовної підлоги вагону);

– використовувався універсальний змішувач-розпилювач типу «сегнерове колесо», у якому змішуються компоненти ГУС, а їх рідинний розчин розпилюється дрібнодисперсним туманом у підвагонному просторі навкруги деталей та вузлів, що горять.

Іншим не менш важливим параметром удосконаленого візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів, було дослідження впливу діаметру розпилення крапель ГУС, кута нахилу подачі ВГР на об’єкт пожежогасіння та їхній вплив на кількість витраченої ВГР на гасіння модельного вогнища пожежі, що і характеризувало ефективність гасіння. Випробування в обох випадках проводилися на модельних зразках дерев’яної підлоги вагону, результати яких наведені у табл. 1.

З даних табл. 1 побачимо, що запропонований шлях удосконалення візку з одним змішувач-розпилювачем переважає за своїми тактико-технічними показниками (ТТХ) пожежогасіння, де передбачається використання двох окремих розпилювачів. У всіх випробуваннях витрата маси ГУС та час гасінні тут помітно знижується. Кращий цей показник було отримано при нахилу розпилювання ГУС під кутом $\alpha = 15^{\circ}$ по відношенню до площини умовної підлоги вагону (по масі зниження витрат ГУС – на 20 %; по часу гасіння – є покращення хоча й невелике до 10 %).

Табл. 1. Результати випробувань з гасіння фрагменту підлоги вагона метро, наближеного за своїм пожежним навантаженням до модельного вогнища класу А

№ досліду	Діаметр крапель ГУС, d мм	Нахил насадку, α град	Маса ГУС на гасіння, m кг		Термін часу гасіння, T с	
			z_1 – один розпилювач	z_2 – два розпилювача	z_1 – один розпилювач	z_2 – два розпилювача
1.	0,5	15	3	3,5	23	25
2.	1	15	2,8	3	21	20
3.	2	15	3,1	3,3	22	23
4.	3	15	3,4	3,5	28	30
5.	4	15	3,7	3,9	35	40
6.	0,5	30	3,3	3,6	22	26
7.	1	30	3,1	3,1	20	22
8.	2	30	3,4	3,4	21	23
9.	3	30	3,6	3,5	28	30
10.	4	30	3,8	4	38	41
11.	0,5	45	3,1	3,6	24	26
12.	1	45	3	3,3	23	25
13.	2	45	3,5	3,6	24	26
14.	3	45	3,7	3,8	28	32
15.	4	45	3,9	4	37	42
16.	0,5	60	3,6	3,8	25	28
17.	1	60	3,1	3,3	23	25
18.	2	60	3,3	3,6	26	27
19.	3	60	3,6	3,8	30	32
20.	4	60	4	4,1	40	42

Для графічної ілюстрації отриманих результатів, побудовано наочні графіки за даними табл. 1, які отримано статистичними методами регресійного аналізу. Природно – тільки для кращого варіанту гасіння одним розпилювачем.

Математичними моделями витрат маси ГУС на гасіння модельного вогнища та витрат часу на гасіння є поліноми другого ступеня з невідомими коефіцієнтами, які визначалися за методом найменших квадратів.

Для зручності аналізу далі зроблено математичні зміни перемінних, які вказані в табл. 1: y=m(T) – витрачена на гасіння маса ГУС, (чи T – термін часу); x_1=d – діаметр крапель; x_2=α – нахил насадку розпилювача, до площини фрагменту моделі підлоги вагону.

Після статистичної обробки даних табл. 1 маємо два полінома – дві моделі:

1) Модель витрат маси ГУС при гасінні:

$$y = 2{,}09x_1^2 - 10{,}75x_2^2 + 0{,}78x_1x_2 - 7{,}29x_1 + 14{,}63x_2 + 2{,}04; \quad (1)$$

2) Модель витрати часу на гасіння:

$$y = 23x_1^2 + 173{,}97x_2^2 + 14{,}69x_1x_2 - 114{,}63x_1 + 227{,}23x_2 - 125{,}58. \quad (2)$$

Дослідження на екстремум першої моделі $y(x_1, x_2)$:

Знаходимо перші похідні:

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, І. К. Кириченко та ін.

$$\begin{aligned}\frac{\partial y}{\partial x_1} &= 4{,}18x_1 + 0{,}78x_2 - 7{,}29 = 0,\\ \frac{\partial y}{\partial x_2} &= 21{,}5x_2 + 0{,}78x_1 + 14{,}63 = 0.\end{aligned} \tag{3}$$

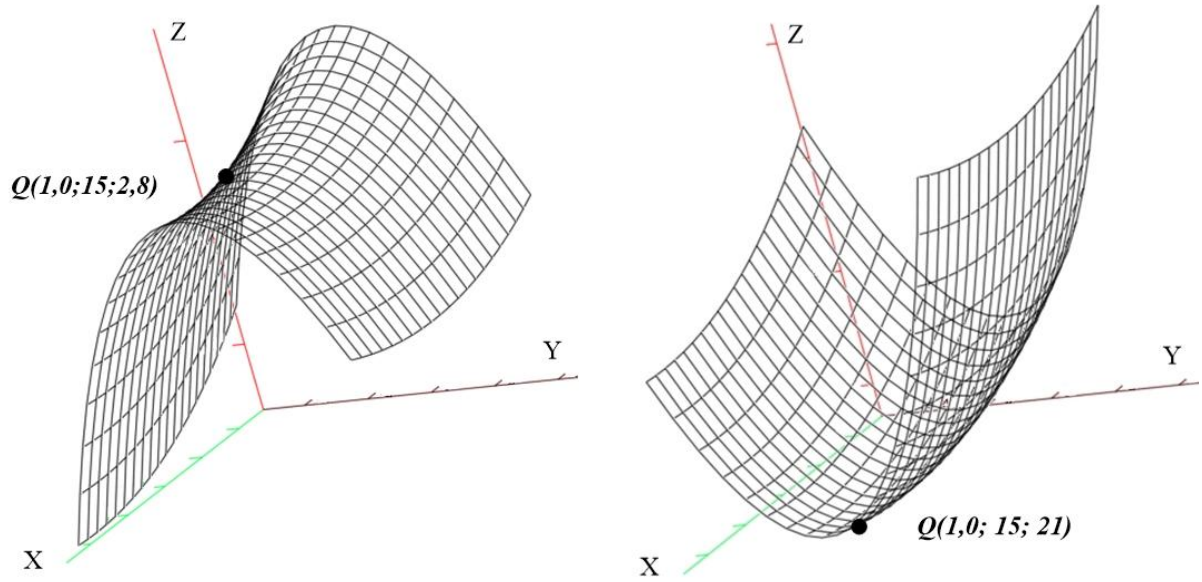
Отримуємо стаціонарну точку Q з координатами (1,0 мм; 15°; 2,8 кг)
Знаходимо похідні другого порядку для тої ж стаціонарної точки Q:

$$A = \frac{\partial^2 y}{\partial x_1^2} = 4{,}18;\ B = \frac{\partial^2 y}{\partial x_1 x_2} = 0;\ C = \frac{\partial y}{\partial x_2^2} = 21{,}5. \tag{4}$$

Знаходимо витрати ГУС на гасіння.

Так як $\Delta = AC - B^2 = 4{,}18 \cdot 21{,}5 - 0 > 0$ і $A > 0$, то Q є точка екстремуму. Підставляємо x_1=1,0 і x_2=15 в формулу моделі 1). В підсумку маємо: $y_{min} = 2831{,}74$ грам (тобто 2,8 кг) витрат ГУС при гасінні модельного осередку пожежі. В звичайній системі координат Декарта z(x,y) ілюстрація цього дослідження має вигляд, зображений на рис. 5, а.

За аналогією, для другої моделі (час гасіння) після досліджень функції $y(x_1,x_2)$ на екстремум в координатах Декарта для моделі 2) маємо рис 5, б.



а) **б)**

Рис. 5. Ілюстрація витрат: а – маси ГУС; б – часу на гасіння

При цьому, найбільш раціональні ТТХ удосконаленого універсального змішувач-розпилювача відповідно є: діаметр крапель ГУС d=1 мм; кут нахилу насадку, α=15 °.

Таким чином, обидва тактико-технічні взаємопов'язані завдання удосконалення візка підвагонного гасіння з підвищенням ефективності й безпеки гасіння ГУС в підвагонному просторі виконано, й можна вважати, що мету досліджень досягнуто.

На основі результатів досліджень подана заявка та отримано позитивне рішення на корисну модель ефективного підвагонного гасіння пожеж на станціях метро [15].

6. Обговорення результатів удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів

Звісно, що запропонований проект удосконаленого візка зі змішувач-розпилювачем двокомпонентних гелеутворючих складів потребує доопрацьовування на реальному дослідному зразку. Хоча з табл. 1 і рис. 5 зрозумілі досягнення більш ефективного гасіння пожеж та значно безпечнішого виконання рятувальних дій при пожежогасінні підвагонного простору метрополітену. За проектом гелеутворюча вогнегасна речовина без зайвих втрат своєї маси покриває усі палаючі елементи підвагонного обладнання. Таким чином, доведено тактико-технічні переваги підвагонного гасіння пожеж в метрополітені гелеутворюючими системами з використанням універсального змішувач-розпилювача, який є невід'ємною частиною удосконаленого візка вузької колії.

Дійсно, запропоновані раціональні рішення скорочують час гасіння пожеж на станціях та зменшують витрати вогнегасних речовин на 10–20 % в порівнянні з іншими, раніше запропонованими пристроями гасіння пожеж під вагонами на станціях метрополітену. Отриманні практичні результати проведених досліджень у вигляді проекту свідчать, що удосконалення візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів може дати зменшення нераціональних втрат компонент ГУС, а також скорочення часу гасіння можливих пожеж у метро на 10–20 %. Це, в свою чергу, дозволить суттєво зменшити прямі та побічні збитки від пожежогасіння та поліпшити безпеку роботи пожежних при гасінні в складних умовах метрополітену, особливо глибокого закладення.

Суттєві тактико-технічні заходи удосконалення візка підвагонного гасіння пожеж на станціях метро, що відображені в цієї статті, підтверджуються отриманим позитивним рішенням про видачу патенту на корисну модель. Тут, завдяки використанню двох компонент ГУС потрібно мати на візку тільки дві ємності по 50 л для кожної компоненти ГУС. За рахунок, цього спрощено блок управління роботою візка, який керує доставкою візка підвагонного гасіння та своєчасним розпиленням ВГР. Підвищення ефективності гасіння пожеж у просторі під вагоном метрополітену досягається за рахунок запропонованого єдиного змішувач-розпилювача типу «сегнерове колесо», який здійснює розпилення готового розчину ГУС на палаючі й не палаючі елементи у підвагонного простору. При чому, використання змішувач-розпилювача дозволяє зменшити на 15 % нераціональні втрати компонент ГУС, в порівняні з подачею двома окремими розпилювачами, за рахунок завчасного зміщування компонент ГУС та їх розпилення у дрібнодисперсному вигляді. У такій спосіб насичується підвагонний простір дисперсійним «туманом». А в ньому знаходяться охоплені вогнем деталі та вузли підвагонного обладнання. У випадку невлучання компонент ГУС прямим попаданням на палаючі елементи під вагоном, за перший прохід візку вздовж пожежі, при реверсивному русі візка краплі «туману» ГУС будуть послідовно нашаруватися на всіх деталях його обладнання під вагоном, запобігаючи розповсюдження вогню у підвагоному просторі на інші вагони метро, локалізуючи та ліквідуючи пожежу.

Всі отримані при дослідженнях результати вочевидь віддають перевагу удосконаленому візку з одним універсальним змішувач-розпорошувачем компонент ГУС. Він об'єднує обидві гелеутворючі складові ГУС, що дає можливість повною мірою використовувати адгезійні властивості, надійно закріплюючи шари гелю на палаючих і не палаючих деталях підвагонного обладнання. Тим самим, припиняється доступ кисню до палаючих елементів підвагонного обладнання, осередок

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, І. К. Кириченко та ін.

пожежі локалізується та ліквідується, а пожежа не розповсюджується вздовж вагонів на весь потяг. Таким чином, спосіб гасіння простору під вагоном, з використанням удосконаленого візка підвагонного газіння з змішувач-розпилювачем ГУС не перешкоджає висадці пасажирів з вагонів (без паніки) та не створює додаткових перешкод роботі персоналу станції і пожежним-рятувальникам в умовах пожежі.

Також необхідно звернути увагу на те, що в теперішній загарбницькій війні рашистів проти України, в умовах активного обстрілу Харкова, Києва і Дніпра російськими снарядами і ракетами харківський метрополітен з вересня 2023 року першим впровадив навчання молодших класів в приміщеннях метрополітену. Тому удосконалення технічних засобів гасіння пожежонебезпечного обладнання у підвагоному просторі стає особливо важливим в умовах сьогодення.

Серед недоліків даного дослідження можна відзначити використання в якості модельного вогнища лише одного з можливих пожежонебезпечних елементів у підвагоному просторі, елемента дерев'яної підлоги. В перспективі планується дослідити ефективність застосування удосконаленого візка підвагонного гасіння зі змішувач-розпилювачем ГУС дрібнодисперсної подачі ВГР для гасіння інших розповсюджених пожежонебезпечних елементів обладнання під вагоном метро, таких як ізолююче покриття ліній електроживлення з гуми та полівінілхлориду .

Розвиток даного дослідження полягає в тому, що досвід вирішення проблеми підвагонного гасіння пожеж може бути розповсюджено взагалі на увесь рейковий транспорт пасажирського й промислового призначення. Під час практичного впровадження візка підвагонного гасіння зі змішувач-розпилювачем ГУС можуть виникнути труднощі з надійністю елементів його конструкції. Дійсно, під час експериментальних випробувань з гасіння умовного підвагонного простору, деякі елементи конструкції візка, при тривалому впливу високих температур, можуть деформуватися. Але ці питання не складно вирішити шляхом застосування сучасних вогнетривких матеріалів.

7. Висновки

1. Розроблено проект удосконалення візка підвагонного гасіння з єдиним змішувач-розпилювачем гелеутворюючих складів типу сегнерове колесо. Розглянуто та наведено принцип роботи удосконаленого візка підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів. Визнано, що конструкція запропонованого єдиного змішувач-розпилювача, що створює умови для змішування компонентів гелеутворюючих складів перед подачею їх на гасіння, дозволяє здійснювати дрібнодисперсне розпилення компонент гелеутворюючих складів з розміром крапель 0,5 мм. В такий спосіб вдається створити крапельний туман, який рівномірно покриває все обладнання під вагоном та створює сприятливі умови для стійкої адгезій гелю на всіх поверхнях пожежогасіння, що в свою чергу дозволяє зменшити часу гасіння та нераціональні втрати вогнегасної речовини на 10–15 %. Запропонована конструкція удосконаленого візка підвагонного гасіння зумовлює ефективне її використання на практиці.

2. Досліджено удосконалений візок підвагонного гасіння з розпилювачем гелеутворюючих складів. Доведено, що використання удосконаленого візку зі змішувач-розпилювачем гелеутворюючих складів підвищує ефективність безпечного підвагонного гасіння пожеж на станціях метро: знижується витрата запропонованої вогнегасної речовини на 15 % і до 10 % скорочується час гасіння можли-

вої пожежі у підвагонному просторі. До цього ж, безперечно поліпшуються умови евакуації пасажирів з вагонів і людей зі станції під час пожеж, що свідчить про доцільність обладнувати такими візками станції метрополітенів. Визначено раціональні значення параметрів подачі вогнегасної речовини, а саме: дисперсність крапель в 1 мм компонент гелеутворюючих складів та кут нахилу насадку $\alpha=15^{o}$, які дозволяє отримати стійку адгезію гелю до всіх поверхонь підвагонного пожежогасіння, таким чином запобігаючи нераціональним втратам компонент гелеутворюючих складів. Встановлено, що такі параметри розпилення гелеутворюючих складів дозволяють, отримати більш високу вогнегасну здатність в порівняні з запропонованими раніше способами подачі вогнегасної речовини у підвагоному проторі, навіть при гасіння об'єктів під різними кутами їх нахилу. Визначено, що зі збільшення дисперсності крапель гелеутворюючих складів більше 1мм стійкість адгезії гелю до палаючих поверхонь зменшується призводячи до їх нераціональних витрат. Експериментально підтверджено, що зменшення дисперсності розпилення менше 1 мм призводить до здування крапель повітряними потоками зменшуючи ефективність гасіння гелеутворюючих складів.

Література

1. Zheng Wei, Zhang Xi, Wang Zhuo-fu Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. Procedia Engineering. 2016. Vol. 135. P. 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147

2. Saveliev D., Khrystych O., Kirieiev O. Binary fire-extinguishing systems with separate application as the most relevant systems of forest fire suppression. European journal of technical and natural science. 2018. Vol. 1. P. 31–36. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7121

3. Ostapov K. M., Senchihin Yu. N., Syrovoy V. V. Development of the installation for the binary feed of gelling formulations to extinguishing facilities. Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences. 2017. Vol. 132. P 75–77. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3891

4. Lyman Dale Ambulatory surgery center safety guidebook. Managing code requirements for fire and life safety. 2018. P. 23–26 doi: 10.1016/B978-0-12-849889-7.00005-4

5. Ostapov et al., Improving the installation of fire gasing with gelelating compounds. Problems of emergency situations. 2021. Vol. 33. P. 4–14. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14116

6. Zhanga Limao, Wua Xianguo, Liub Menjie, Liuc Wenli, Ashuri Baabak Discovering worst fire scenarios in subway stations: A simulation approach. Automation in construction. 2019. Vol. 99. P. 183–196. doi: 10.1016/j.autcon.2018.12.007

7. Gravit M. Vaititckii A. Shpakova A. Subway constructions fire safety regulatory. Requirements procedia engineering. 2016. Vol. 165. P. 1667–1672. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.908

8. Pietukhov R., Kireev A., Slepuzhnikov E., Chyrkina M., Savchenko A. Lifetime research of rapid-hardening foams. Problems of emergency situations. 2020. Vol. 31. P. 226–233. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11675

9. De-xu Du, Xu-hai Pan, Min HUA. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. Procedia Engineering. 2018. P. 142–148.

doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.126

10. Ng Y. W., Chow W. K., Cheng C. H., Chow C. L. Scale modeling study on flame colour in a ventilation-limited train car pool fire. Tunnelling and underground space technology. 2019. Vol. 85. P. 375–391 doi: 10.1016/j.tust.2018.12.026

11. Zeng Long, Maohua Zhong, Junfeng Chen, Huihang Cheng. Study on emergency ventilation strategies for various fire scenarios in a double-island subway station. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2023. Vol. 235. 105364. doi: 10.1016/j.jweia.2023.105364

12. Kai Wang, Weiyao Cai, Yuchen Zhang, Haiqing Hao, Ziting Wang. Numerical simulation of fire smoke control methods in subway stations and collaborative control system for emergency rescue. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 147. P. 146–161. doi: 10.1016/j.psep.2020.09.033

13. Остапов К. М., Сенчихін Ю. М., Аветісян В. Г., Гапоненко Ю. І., Кириченко І. К. Підвищення ефективності гасіння пожеж у підвагоному просторі метро гелеутворюючими складами. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. 2(38). P. 267–280. URL: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/38/18.pdf

14. 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

15. Пат. 154597 Україна, МПК (2023.01) A62C 35/00 Візок для підвагонного гасіння пожеж гелеутворюючими складами / Остапов К. М., Сенчихін Ю. М., Аветісян В. Г., Мележик Р. С.; заявник та патентовласник Нац. у-т цив. зах. України – u202303215; заяв. 03.07.2023; опубл. 23.11.2023, Бюл. № 47 URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18841

K. Ostapov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
Y. Senchykhyn*[1]*, *PhD, Professor, Professor of the Department*
V. Avetisyan*[1]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
I. Kirichenko*[2]*, *DSc, Professor, Professor of the Department*
O. Tarasenko*[3]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine*
[3]*Karazin Banking Institute, Kharkiv, Ukraine*

IMPROVEMENT OF THE UNDERCAR EXTINGUISHING TROLLEY WITH A GEL-FORMING COMPOSITION SPRAYER

Together with the general improvement of the undercarriage fire extinguishing trolley at metro stations, a universal mixer-sprayer of the gel-forming composition is proposed. Solutions have been worked out on laboratory equipment, which ensure an increase in the efficiency of fire extinguishing, and ultimately simplify the conditions for conducting rescue operations at subway stations. The project of improving the cart with a mixer-sprayer of gel-forming compositions is proposed. The improved trolley makes it easier to carry out rescue operations and increases the efficiency of extinguishing. The gel-forming fire-extinguishing substance itself covers the burning elements of the undercarriage equipment without excessive loss of mass. As a result of research: the tactical and technical advantages of undercarriage fire extinguishing in the subway with gel-forming systems using a universal mixer-sprayer, which is an integral part of an improved narrow-gauge trolley, have been proven. Rational solutions are proposed that shorten the time of extinguishing fires at stations and reduce the consumption of extinguishing agents by 10–20 % compared to other previously proposed fire extinguishing devices under cars at metro stations. Simulation studies of the tactical and technical qualities of the improved cart with a universal mixer-sprayer of gel-forming composition of the «Segner wheel» type were carried out. The

cart is capable of extinguishing likely complex fires under cars at subway stations. In addition, in all cases of under-car fire extinguishing at subway stations, it is expected to improve the conditions of emergency rescue operations when evacuating people from the station premises and from the cars involved in the fire.

Keywords: gel-forming composition, fire-extinguishing powder, subway, subway cars, undercarriage extinguishing trolley

References

1. Wei, Z., Xi, Z., Zhuo-fu, W. (2016). Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. Procedia Engineering, 135, 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147

2. Saveliev, D., Khrystych, O., Kirieiev, O. (2018). Binary fire-extinguishing systems with separate application as the most relevant systems of forest fire suppression. European journal of technical and natural science, 1, 31–36. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7121

3. Ostapov, K., Senchihin, Yu., Syrovoy, V. (2017). Development of the installation for the binary feed of gelling formulations to extinguishing facilities. Science and education a new dimension. Natural and technical sciences, 132, 75–77. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/3891

4. Dale, L. (2018). Ambulatory surgery center safety guidebook. Managing code requirements for fire and life safety, 15, 23–26. doi: 10.1016/B978-0-12-849889-7.00005-4

5. Ostapov, K et al. (2021). Improving the installation of fire gasing with gelelating compounds. Problems of emergency situations, 33, 4–14. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14116

6. Zhanga, L., Wua, X., Liub, M., Liuc, W., Ashuri, B. (2019). Discovering worst fire scenarios in subway stations: A simulation approach. Automation in construction, 99, 183–196. doi: 10.1016/j.autcon.2018.12.007

7. Gravit, M., Vaititckii, A., Shpakova, A. (2016). Subway constructions fire safety regulatory. Requirements procedia engineering, 165, 1667–1672. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.908

8. Pietukhov, R., Kireev, A., Slepuzhnikov, E., Chyrkina, M., Savchenko, A. (2020). Lifetime research of rapid-hardening foams. Problems of emergency situations, 31, 226–233. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/11675

9. De-xu, D., Xu-hai, P., Min, H. (2018). Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. Procedia engineering, 142–148. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.126

10. Ng, Y., Chow, W., Cheng, C., Chow, C. (2019). Scale modeling study on flame colour in a ventilation-limited train car pool fire. Tunnelling and underground space technology, 85, 375–391. doi: 10.1016/j.tust.2018.12.026

11. Long, Z., Zhong, M., Chen, J., Cheng, H. (2023). Study on emergency ventilation strategies for various fire scenarios in a double-island subway station. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 235, 105364. doi: 10.1016/j.jweia.2023.105364

12. Wang, K., Cai, W., Zhang, Y., Hao, H., Wang, Z. (2021). Numerical simulation of fire smoke control methods in subway stations and collaborative control system for emergency rescue. Process Safety and Environmental Protection, 147, 146–161. doi: 10.1016/j.psep.2020.09.033

13. Ostapov, K. M., Senchykhin, Yu. M., Avetisyan, V. H., Haponenko, Yu. I.,

Kyrychenko, I. K. (2023). Pidvyshchennya efektyvnosti hasinnya pozhezh u pidvahonomu prostori metro heleutvoryuyuchymy skladamy. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 2(38), 267–280. Available at: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/38/18.pdf

14. 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

15. Ostapov. K. M., Senchykhin, Yu. M., Avetisyan, V. H., Melezhyk, R. S. (2023). Pat. 154597 Ukrayina, MPK (2023.01) A62S 35/00 Vizok dlya pidvahonnoho hasinnya pozhezh heleutvoryuchymy skladamy zayavnyk ta patentovlasnyk Nats. u-t tsyv. zakh. Ukrayiny, u202303215; 03.07.2023, 23.11.2023. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18841

Надійшла до редколегії: 05.03.2024
Прийнята до друку: 17.04.2024

УДК 614. 84

О. М. Григоренко, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4629-1010)*
Н. В. Саєнко, *к.т.н., доцент, ст. викл. (ORCID 0000-0003-4873-5316)*
Є. С. Золкіна, *PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0003-2562-2546)*
В. О. Липовий, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1967-0720)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАКТИВНИХ ВОГНЕЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ

Запропоновано оптимізований метод оцінки вогнезахисної ефективності реактивних покриттів, що може бути застосований під час розробки та дослідженні нових рецептур вогнезахисних складів. Для досягнення поставленої мети проведено критичний аналіз існуючих методів оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів, як затверджених нормативними документами, так і таких, що використовувалися дослідниками для експрес-оцінок ефективності вогнезахисних засобів. За результатами аналізу переваг і недоліків досліджуваних методів для скорочення часу на підготовку та оброку результатів експериментів запропоновано оптимізований метод оцінки ефективності реактивних вогнезахисних покриттів. Запропонований оптимізований метод передбачає використання електричної печі з ізольованою випробувальною камерою для акумуляції тепла як джерела теплового випромінювання, яка дозволяє отримати температуру на реверсі металевої пластини понад 950 °С. У якості критерію вогнезахисної ефективності запропоновано використання порівняння часу досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевих пластин, що захищені вогнезахисними покриттями. Досліджено ефективності вогнезахисту металевої пластини за запропонованим методом для трьох зразків вогнезахисних засобів реактивного типу: покриття на основі епоксидного олігомеру, поліфосфату амонію, гідроксиду алюмінію та інтеркальованого графіту, покриття на стирол-акриловій основі промислового виробництва та відомого покриття на основі епоксидного олігомеру наповненого монофосфатом амонію та інтеркальованим графітом. Результати експерименту дозволили зробити порівняльну оцінку ефективності вогнезахисту досліджуваних покриттів. Використання оптимізованого методу дозволяє суттєво спростити експеримент та скоротити час на підготовку зразків та обробку його результатів.

Ключові слова: ефективність вогнезахисту, метод, вогнезахисне покриття, випробування, вогнезахист металу, будівельні конструкції

1. Вступ

Металеві конструкції широко використовуються в промисловості та будівництві. Проте, в умовах пожежі, незахищені металеві конструкції втрачають свою несучу здатність протягом 0,1–0,4 годин [1], оскільки критична температура для конструкцій з різних сталей в середньому складає 470–550 °С, з алюмінієвих сплавів – 165–225 °С. Відтак, вогнезахисна ефективність покриттів для протипожежного захисту металевих конструкцій буде визначатися проміжком часу від початку температурного впливу до моменту досягнення конструкції критичної температури. Найперспективнішим способом забезпечення нормативної межі вогнестійкості будівельних конструкцій, що не обтяжує будівельні конструкції та може застосовуватися для конструкцій складної конфігурації, є вогнезахист за допомогою реактивних вогнезахисних покриттів (РВП). Засоби цього типу під дією полум’я спучуються з утворенням на поверхні будівельної конструкції вогнезахисного теплоізолювального шару. Реактивні вогнезахисні покриття є складними з точки зору взаємодії його основних компонентів: плівкоутворювача, карбонізуючого агенту, каталізатора (джерела кислоти), джерела вуглецю та газоутворювача. Це спричиняє певні труднощі під час досліджень спрямованих на розробку нових рецептур РВП,

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

зокрема на дослідження кратності їх спучування під впливом температури полум'я, структури утвореного коксового шару та його міцності, а також вогнезахисної ефективності. Складність розробки нових рецептур РВП полягає у необхідності підготовки великої кількості зразків для опрацювання плану експерименту та безпосередньо у складності методів випробувань. Особливо це стосується досліджень з визначення ефективності вогнезахисту будівельних конструкцій, зокрема металевих.

Таким чином, недосконаліть існуючих методів оцінки ефективності реактивних вогнезахисних покриттів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Реактивні вогнезахисні покриття мають ряд переваг, серед яких: простота використання, економічність, широкий спектр застосування тощо. Однак, необхідно враховувати, що реактивний спосіб вогнезахисту полягає у використанні тонкошарових покриттів, склад яких спеціально підібрано з таким розрахунком, щоб забезпечити перебіг хімічної реакції під дією високих температур. Під час нагрівання компоненти реактивної системи утворюють щільний теплоізолювальний шар і оберігають конструкцію від температурного впливу. Процеси термічних перетворень цього типу покриттів супроводжуються цілим комплексом ендотермічних хімічних реакцій, в ході яких виділяються речовини, що уповільнюють процес горіння. Матеріал, що спучується утворює спінену масу або звуглений залишок.

Дослідженню вогнезахисних покриттів, у тому числі й реактивних, присвячено чимало робіт. Зокрема в роботі [2] наведено результати досліджень структури та товщини спученого коксового шару реактивних вогнезахисних покриттів на основі меламін-формальдегідних смол та стирол-акрилових дисперсій. Наведені результати дають лише загальне уявлення про ефективність вогнезахисту оскільки дослідження проводяться на зразках, що випробовують за визначеної температури (500 °С), а структура та товщина спученого коксового шару не дозволяють кількісно оцінити ефективність вогнезахисту з визначенням часу досягнення граничного стану за втратою теплоізолювальної здатності.

Критичний аналіз сучасних методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів для будівельних конструкцій наведено у роботі [3]. Зокрема наведено основні положення і методи оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів різних типів, у тому числі й реактивних вогнезахисних покриттів для металевих конструкцій. Проте у роботі не акцентовано увагу на недоліках тих чи інших методів.

В Україні методи дослідження вогнезахисних реактивних покриттів для металевих конструкцій визначено відповідно до національного стандарту України ДСТУ Б В.1.1-17 [4]. Цей нормативний акт регулює і залежність мінімальної товщини вогнезахисного матеріалу від коефіцієнта перерізу сталевого профілю та нормованої межі вогнестійкості для несучої сталевої конструкції. Сутність методу полягає у нагріванні набору зразків у стандартному температурному режимі з подальшим оцінюванням даних випробувань за допомогою методів математичного аналізу для отримання характеристик вогнезахисної здатності покриття. В Європейському союзі для класифікації вогнезахисної ефективності реактивних покриттів для несучих металевих конструкцій використовують EN 13381-8 [5], що відповідає державному стандарту України ДСТУ Б В.1.1-17 [4].

Методи [4, 5] дозволяють оцінити вогнезахисну ефективність вогнезахисних покриттів в умовах стандартного температурного режиму пожежі. Під час випробувань металеві зразки встановлюють в вогневу піч та за допомогою термопар, розташованих у визначених місцях, знімають показники температури зразків для різної тривалості вогневого впливу без навантаження. За результатами випробувань визначають залежності між температурою, яка впливає на досліджуваний зразок, товщиною шару вогнезахисного матеріалу та граничною температурою конструктивного матеріалу, на який нанесено вогнезахисне покриття.

Оскільки за стандартами [4, 5] випробування повинні проводитися на габаритних зразках, що потребує відповідного обладнання, методи не цілком придатні для використання саме у процесі розробки та дослідження нових рецептур РВП, а можуть бути використані на заключному етапі експерименту для підтвердження ефективності розроблених вогнезахисних покриттів.

У роботі [6] запропонована експрес-методика, суть якої полягає у визначенні вогнезахисної здатності покриття під час теплової дії на дослідний зразок і визначенні часу від початку теплової дії до настання граничного стану для дослідного зразка металевої пластини розміром 600×600×5 мм з нанесеним на неї засобом вогнезахисту. Для проведення досліджень використовується піч для теплофізичних випробувань малогабаритних фрагментів будівельних конструкцій та їх окремих вузлових і стикових з'єднань, у якій підтримується стандартний температурний режим пожежі. Недоліком методу є складність регулювання паливної системи для забезпечення відповідного температурного режиму, необхідність використання спеціалізованого обладнання (печі), що значно підвищує трудоємкість, а, отже, і вартість, процесу розробки та дослідження нових рецептур вогнезахисних покриттів.

В той же час, ряд експериментальних досліджень [7, 8] присвячено визначенню процесів термохімічних перетворень вогнезахисних покриттів та їх вогнезахисної ефективності за не стандартними методиками. Так, у роботі [7] для порівняння вогнезахисної здатності реактивних покриттів використано методику випробування РВП за температурних умов, що відрізняються від стандартного режиму пожежі. Використана у [7] методика дозволяє оцінити ефективність РВП шляхом визначення коефіцієнта вогнезахисної здатності як функції від товщини покриття та швидкості нагріву у печі. Однак, недоліком використаної у [7] методики є використання печі та зразків складної конфігурації, що ускладнює підготовку до проведення експерименту та збільшує час на обробку його результатів.

У роботі [8] описано методика, яка може враховувати різні вогнезахисні властивості РВП при випробуваннях за різних температурних режимів. Модель базується на експериментальному дослідженні, що проводяться у конусному калориметрі. Показано, що метод дозволяє зробити порівняння вогнезахисної ефективності шляхом визначення температури пластини із протилежного боку до нагрівального приладу за різних значень теплового випромінювання нагрівального елементу. Результати обробки експериментальних даних дозволяють визначати теплопровідність спученого коксового шару вогнезахисного покриття після його стабілізації. Однією із переваг вказаного методу є можливість дослідження поведінки реактивних вогнезахисних покриттів за різних умов нагрівання, що відрізняються від стандартного температурного режиму пожежі. Однак, не вирішеним залишається питання оцінки ефективності вогнезахисного покриття шляхом визначення часу досягнення граничного стану за втратою теплоізолювальної здатності.

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

Нормативним документом [9] передбачено визначення вогнезахисної здатності вогнезахисних засобів, що спучуються (збільшують свій об'єм під час теплового впливу). Випробування здійснюється методом визначення об'ємного та (або) лінійного коефіцієнта спучення вогнезахисного матеріалу. Оцінка ефективності вогнезахисного засобу може бути визначена шляхом порівняння об'ємного та (або) лінійного коефіцієнтів спучення досліджуваних РВП. Випробування проводять у електричній печі за фіксованої температури 340±5 °С, що є достатньою для ініціації протікання фізико-хімічних перетворень між компонентами РВП, проте не враховує процеси у реакційному середовищі за температур, що є критичними для сталевих будівельних конструкцій (470–550 °С).

У роботі [10] як критерій вогнезахисної ефективності РВП використовувалося порівняння температур після 30 хв. впливу полум'я пальника на реверсі металевих пластин без засобів вогнезахисту та металевих пластин, що були попередньо захищені досліджуваними вогнезахисними засобами. Як джерело тепла використовувався газовий пальник з максимальною температурою полум'я 1150 °С. Як показали досліджень, випробування також проводиться за температурного режиму, що відрізняється від стандартного режиму пожежі – максимальна температура на реверсі навіть незахищеної металевої пластини не перевищує значень 470 °С.

Наведений аналіз свідчить про недоцільність використання існуючих методів при розробці та дослідженні нових рецептур реактивних вогнезахисних покриттів. Це питання може бути вирішеним шляхом оптимізації існуючих методів випробувань, що дозволили б враховувати час досягнення критичних температур металевими конструкціями, що захищені відповідними РВП.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є оптимізація методу оцінки вогнезахисної ефективності реактивних покриттів для використання під час розробки та дослідженні нових рецептур вогнезахисних складів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– оптимізувати метод оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів;

– дослідити ефективність вогнезахисту металевої конструкції за оптимізованим методом.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є ефективність реактивних вогнезахисних покриттів. Предметом дослідження обрано метод випробувань вогнезахисної ефективності, що передбачає використання електричної печі з ізольованою випробувальною камерою для акумуляції тепла як джерела теплового випромінювання, яка дозволяє отримати температуру на реверсі металевої пластини понад 950 °С.

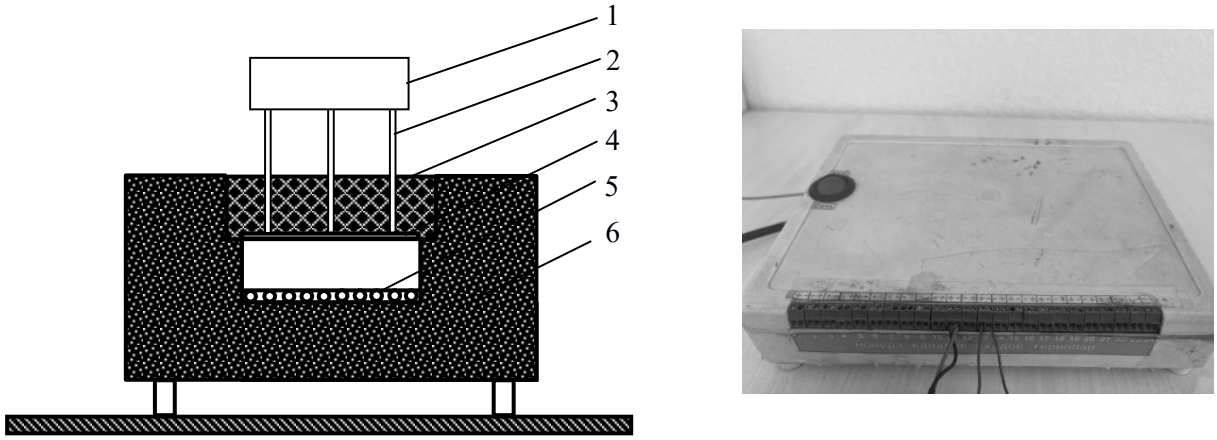
Основна гіпотеза полягає у можливості використання спрощених методів оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів у процесі їх розробки. При цьому як критерій ефективності запропоновано використання порівняння часу досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевих пластин, що захищені вогнезахисними покриттями.

У якості випробувального обладнання пропонується використовувати електричну піч з ізольованою випробувальною камерою для акумуляції тепла. Схема ви-

пробувальної печі, що оснащена електричними нагрівачами, наведена на рис. 1а. Випробування пропонується здійснювати на 3 зразках металевих пластин розмірами 120×120×3 мм для кожного досліду.

Вимірювання значень температури пропонується здійснювати за допомогою термопар типу L та двадцятичотирьохканального приладу фіксації температури (рис. 1б). Для контролю температури всередині нагрівальної камери – одну термопару. Для контролю температури зворотного від нагрівальної камери боку пластинки, замість однієї термопари, що передбачено методом випробувань наведеним у [10], пропонується використовувати п’ять термопар, розміщених у п’яти точках: перша – в геометричному центрі зразка, а ще чотири – рівновіддалені від центральної точки по діагоналі, на відстані, що дорівнює 0,25 довжини цієї діагоналі.

Порядок проведення випробувань. Попередньо підготовлену пластину розмірами 120×120×3 мм з нанесеним вогнезахисним засобом розміщують у випробувальній печі та фіксують термопари у спосіб, що наведено на рис. 1а. Одночасно із ввімкненням електричних нагрівальних елементів відбувається ввімкнення вимірювання приладом фіксації температури. Випробування проводиться доти, доки температура на зовнішній стороні металевої пластини не досягне 500 °С хоча б у 3 точках. Усереднений за результатами випробування на 3 зразках час є часом досягнення критичної температури (500 °С).



а) б)

Рис. 1. Обладнання, що використовували для порівняльної оцінки вогнезахисної ефективності РВП: а – схема випробувальної печі: 1 – прилад для фіксації температури, 2 – термопари, 3 – блок утримувача зразка, 4 – дослідний зразок (пластина із нанесеним вогнезахисним засобом), 5 – нагрівальний елемент, 6 – теплоізоляція; б – прилад фіксації температури

Для перевірки гіпотези проведено дослідження ефективності вогнезахисту металевої конструкції для трьох зразків вогнезахисних засобів реактивного типу: покриття на основі епоксидного олігомеру, поліфосфату амонію та інтеркальованого графіту (ПАГ-2) [11], РВП на стирол-акриловій основі промислового виробництва та відомого покриття на основі епоксидного олігомеру наповненого монофосфатом амонію та інтеркальованим графітом (МАФ+ІГАК) [12].

5. Оптимізація методу оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів

Для оптимізації було обрано описаний в [10] метод. На відміну від наведеного методу випробувань, як критерій ефективності обрано не порівняння темпера-

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

тур на реверсі металевої пластини, а порівняння часу досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевих пластин, що захищені вогнезахисними покриттями. Як джерело теплового випромінювання пропонується використовувати електричну піч з ізольованою на відміну від [10] випробувальною камерою, що сприяє акумуляції тепла (рис. 1, а). При цьому температурний режим печі є повільнішим від стандартного температурного проте дозволяє отримати температуру на реверсі металевої пластини понад 950 °С, що цілком достатньо для порівняльної оцінки вогнезасихисної ефективності РВП для металевих конструкцій. Дослідження за таких умов є обґрунтованим, оскільки, як правило, зі зменшенням інтенсивності нагрівання ефективність вогнезахисту реактивних покриттів знижується, що пояснюється сповільненням протікання фізико-хімічних перетворень між компонентами РВП.

Для побудови залежності температури зовнішньої сторони пластини від часу пропонується брати середнє значення температури виміряне у п’яти точках усереднене за результатами 3 випробувань. Оцінка ефективності вогнезахисту покриттів за допомогою оптимізованого методу може бути здійснена шляхом порівняння результатів випробувань досліджуваного покриття з результатами випробувань інших вогнезахисних покриттів, у випадку, якщо випробування проводяться за однакових умов.

6. Дослідження ефективності вогнезахисту металевої конструкції за оптимізованим методом

Для апробації оптимізованого методу проводили дослідження ефективності вогнезахисту металевої конструкції для трьох зразків вогнезахисних засобів реактивного типу: отриманого у результаті попередніх розробок покриття на основі епоксидного олігомеру, поліфосфату амонію та гідроксиду алюмінію у якості антипіренів та інтеркальованого графіту як додаткове джерело вуглецю (ПАГ-2) [11], РВП на стирол-акриловій основі промислового виробництва та відомого покриття на основі епоксидного олігомеру наповненого монофосфатом амонію у якості антипірену та інтеркальованим графітом у якості додаткового джерела вуглецю (МАФ+ІГАК) [12].

Залежність зміни температури всередині дослідної установки, на зовнішній стороні металевої пластини, а також на зовнішній стороні металевої пластини, захищеної вогнезахисним засобом на стирол-акриловій основі, відомим епоксиполімером, наповненим МАФ+ІГАК [12] та розробленим реактивним вогнезахисним покриттям ПАГ-2 [11] представлено на рис. 2.

Покриття на металеву пластину наносили товщиною 1 мм для усіх зразків, що досліджувалися.

7. Обговорення результатів досліджень, отриманих під час випробувань за оптимізованим методом

Досягти мети роботи вдалося досягти завдяки аналізу переваг та недоліків існуючих методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів, запропонувавши удосконалення методу, описаного в [10] завдяки використанню електричної печі з ізольованою випробувальною камерою для акумуляції тепла як джерела теплового випромінювання, що дозволяє отримати температуру на реверсі металевої пластини понад 950 °С. У якості критерію вогнезахисної ефективності запропоновано використання порівняння часу досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевих пластин, що захищені вогнезахисними покриттями.

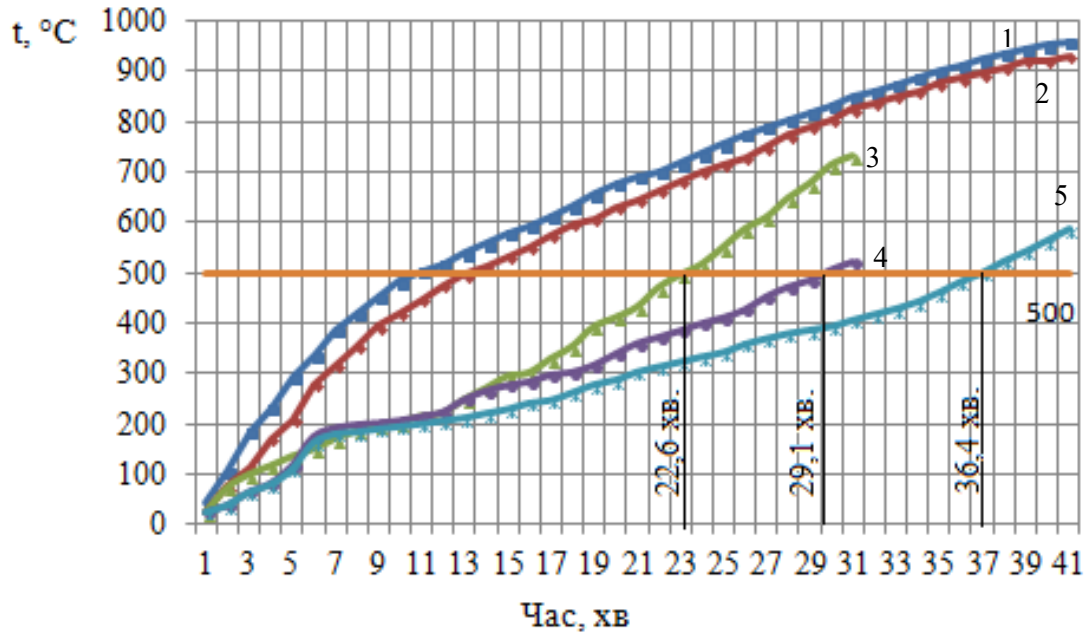


Рис. 2. Залежність зміни температури всередині дослідної установки (1), на зовнішній стороні металевої пластини (2), а також на зовнішній стороні металевої пластини, захищеної вогнезахисним засобом на стирол-акриловій основі (3), епоксиполімером, наповненим МАФ+ІГАК [12] (4) та покриттям ПАГ-2 [11] (5)

Використання оптимізованого методу оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів дозволяє істотно скоротити час на підготовку зразків при плануванні та проведенні експерименту. Використання як критерію ефективності часу прогрівання до критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевої пластини, що захищена вогнезахисними покриттями, суттєво спрощує експеримент та скорочує час на обробку його результатів. Використання електричної печі із температурним режимом, відмінним від стандартного режиму пожежі, по-перше, дає змогу оцінити ефективність вогнезахисту в умовах повільного розвитку пожежі, а, по-друге, – значно спрощує умови експерименту, що надзвичайно важливо під час досліджень спрямованих на розробку та дослідження нових рецептур реактивних вогнезахисних покриттів. Крім того, специфіка перетворень у покриттях такого типу свідчить про те, що під час нагрівання у режимах, повільніших за стандартний температурний пожежі, спостерігається тенденція до зменшення ефективності вогнезахисту, що обумовлено зсувом температурних меж синхронізації фізико-хімічних процесів у конденсованій фазі системи «плівкоутворювач – карбонізуючий агент – кислотний агент – газоутворювач» у бік нижчих температур. Характер та узгодженість протікання хімічних реакцій та фізичних процесів на цьому етапі є важливими, оскільки вони повинні відбуватися у певній послідовності та за визначених температур і тільки у цьому випадку можливе утворення міцного теплоізолювального вуглецевого шару. Отже, випробування за температурного режиму, повільнішого за стандартний температурний є обґрунтованим, оскільки більше відповідає умовам, притаманним реальній пожежі.

Як видно із наведених результатів досліджень (рис. 2), час прогрівання зовнішньої сторони незахищеної металевої пластини становить близько 12 хв. Використання РВП промислового виробництва на стирол-акриловій основі дозволяє відтермінувати цей час до 22,6 хв. При використанні відомого вогнезахисного покриття на епоксидній основі, наповненого МАФ+ІГАК, час досягнення критичної

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

температури становить 29,1 хв. Використання з метою вогнезахисту металевих конструкції розробленого епоксидного покриття ПАГ-2 дозволяє збільшити час прогрівання металевої пластини до 36,4 хв. Результати досліджень дозволяють зробити висновок, що ефективність вогнезахисту металевої пластини покриттям ПАГ-2 у 1,3 рази вища у порівнянні з відомим аналогом на епоксидній основі та в 1,6 разів вища за цей показник в порівнянні з промисловим зразком на стирол-акриловій основі.

Для підтвердження наведених у роботі даних доцільним є проведення досліджень ефективності покриттів за стандартними методами.

Разом з тим, випробування за наведеним у роботі методом мають свої обмеження та недоліки – конструкція печі не дозволяє проводити дослідження на розмірних зразках будівельних конструкцій, що дало б змогу оцінити ефективність їх вогнезахисту. Суттєвим недоліком є також відсутність можливості регулювання температурного режиму у випробувальній камері печі. Це дало б змогу робити оцінку ефективності вогнезахисту з урахуванням інтенсивності теплового потоку, що є важливим для дослідження характеру перебігу фізико-хімічних перетворень між компонентами реактивного вогнезахисного покриття з різними умовами нагрівання.

Для врахування недоліків використаного у дослідженнях методу доцільним є удосконалення випробувальної печі, що б дало змогу збільшити потужність джерела теплового випромінювання та забезпечити можливість зміни параметрів теплового потоку, у тому числі й передбачати випробування за стандартним температурним режимом пожежі.

Таким чином, застосування оптимізованого методу оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів дозволяє зробити порівняльну оцінку ефективності РВП, використовуючи як критерій час досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевої пластини.

8. Висновки

1. Оптимізовано метод оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів. Для цього проведено критичний аналіз існуючих методів оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів. Встановлено, що під час досліджень, спрямованих на розробку нових рецептур вогнезахисних складів, доцільним є використання спрощених методів випробувань. Критерієм ефективності у цьому випадку може слугувати час досягнення критичної температури (500 °С) на зовнішній стороні металевої пластини, що захищена вогнезахисним покриттям. Запропоновано використання оптимізованого методу оцінки вогнезахисної ефективності реактивних вогнезахисних покриттів, що базується на порівнянні результатів випробувань металевих зразків, захищених вогнезахисними складами. У якості критерію ефективності запропоновано використання часу прогрівання до критичної температури (500 °С) металевої пластини з нанесеним реактивним вогнезахисним покриттям. Використання оптимізованого методу дозволяє скоротити час на підготовку зразків при плануванні та проведенні експерименту, а також дослідити ефективність реактивних вогнезахисних покриттів за температурних режимів, що відрізняються від стандартного режиму пожежі.

2. Досліджено ефективності вогнезахисту металевої конструкції за запропонованим методом. Дослідження проводилось для трьох зразків вогнезахисних засобів реактивного типу: покриття на основі епоксидного олігомеру, поліфосфату амонію, гідроксиду алюмінію та інтеркальованого графіту ПАГ-2, покриття на

стирол-акриловій основі промислового виробництва та відомого покриття на основі епоксидного олігомеру наповненого монофосфатом амонію та інтеркальованим графітом. Ефективність вогнезахисту металу покриттям ПАГ-2, оцінена шляхом порівняння часу прогрівання металевої пластини, у 1,3 рази вище за відомі аналоги на епоксидній основі та в 1,6 разів вище за покриття на стирол-акриловій основі промислового виробництва, випробуваних за однакових умов. Застосування запропонованого оптимізованого методу дозволяє зробити порівняльну оцінку ефективності реактивних вогнезахисних покриттів, використовуючи як критерій час досягнення критичної температури (500 °С) на реверсі металевої пластини.

Література

1. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. Journal of Constructional Steel Research. 2019. Vol. 162. 105712. doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

2. Gravit Marina, et al. Estimation of the pores dimensions of intumescent coatings for increase the fire resistance of building structures. Procedia engineering. 2015. Vol. 117. P. 119–125. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.132

3. Новак С. В., Дріжд В. Л., Добростан О. В. Аналіз сучасних Європейських методів оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів для будівельних конструкцій. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2018. № 1(5). С. 74–84. URL: https://firesafety.at.ua/Visnyk_new/N1_2018/10_novak_dobrostan.pdf

4. ДСТУ Б В.1.1-17:2007. Захист від пожежі. Вогнезахисні покриття для будівельних несучих металевих конструкцій. Метод визначення вогнезахисної здатності (ENV 13381-4:2002, NEQ). [Чинний від 2008-01-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2007. 60 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=41506

5. EN 13381-8:2013. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members. [Чинний від 2013-05-01]. Brussels: European Committee for Standardization. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/df0cdd6b-9ef2-47fc-874b-414ae34aa5cc/en-13381-8-2013

6. Борис О. П., Половко А. П., Юзьків Т. Б. Експрес-методика оцінювання вогнезахисної здатності вогнезахисних матеріалів. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2012. № 2(26). С. 95–99. URL: https://firesafety.at.ua/visnyk/2012_No_2-26/15-Boris_Uz_kiv.pdf

7. Андронов В. А., Рибка Є. О. Порівняння вогнезахисної здатності реактивних покриттів ОВК, ЕНДОТЕРМ 40202 та ЕНДОТЕРМ ХТ-150 за різних швидкостях нагріву. Науковий вісник УкрНДІПБ. 2012. № 2(26). С. 1–7. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/461/1/24.pdf

8. Wang Y., Goransson U., Holmstedt G., Omrane A. A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter. Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. P. 235–246. URL: https://www.researchgate.net/profile/Yong-Wang-115/publication/240821850_A_Model_For_Prediction_Of_Temperature_In_Steel_Structure_Protected_By_Intumescent_Coating_Based_On_Tests_In_The_Cone_Calorimeter/links/5645fe6d08ae9f9c13e72cbf/A-Model-For-Prediction-Of-Temperature-In-Steel-Structure-Protected-By-Intumescent-Coating-Based-On-Tests-In-The-Cone-Calorimeter.pdf

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

9. ДСТУ-Н-П Б В.1.1-29:2010. Захист від пожежі. Вогнезахисне обробляння будівельних конструкцій. Загальні вимоги та методи контролювання. [Чинний від 2011-11-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 9 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26657

10. Silveira M. R. D., Peres R. S., Moritz V. F., Ferreira C. A. Intumescent coatings based on tannins for fire protection. Materials Research. 2019. Vol. 22(2). e20180433. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0433

11. Hryhorenko O., Zolkina Ye., Saienko N., Popov Yu. Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer of Epoxyamine Compositions. IOP Conference Series: Problems of Emergency Situations: Materials and Technologies II. 2021. Vol. 1038. P. 539–546. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539

12. Яковлева Р. А., Фомин С. Л., Сафонов Н. А., Безуглый А. М. Новые огнезащитные покрытия по металлу и идентификация их теплофизических свойств. Науковий вісник будівництва. 2008. № 48. С. 250–268

O. Hryhorenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
N. Saienko, *PhD, Assistant Professor of the Department*
Ye. Zolkina, *PhD, Lecturer of the Department*
V. Lypovyi, *Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE METHOD OF ASSESSING THE EFFICIENCY OF REACTIVE FIRE PROTECTION COATINGS

A critical analysis of methods for assessing the fire-resistant effectiveness of reactive fire-resistant coatings was carried out. It was established that during research aimed at the development of new formulations of flame retardant compounds, it is expedient to use simplified test methods, which would make it possible to significantly simplify the experiment and reduce the time for processing its results. A method of comparative assessment of fire protection efficiency using an electric oven with an isolated test chamber for heat accumulation as a source of thermal radiation, which allows obtaining a temperature on the reverse side of a metal plate above 950 °C, is proposed. As a criterion of fire protection efficiency, it is proposed to use a comparison of the time of reaching the critical temperature (500 °C) on the outside of metal plates protected by fire protection coatings. The effectiveness of fire protection of a metal plate according to the proposed method was investigated for three samples of reactive type fire retardants: a coating based on epoxy oligomer, ammonium polyphosphate, aluminum hydroxide and intercalated graphite, a coating based on styrene-acrylic industrial production and a known coating based on epoxy oligomer filled with ammonium monophosphate and intercalated graphite. It was established that the effectiveness of metal fire protection with a coating based on epoxy oligomer, ammonium polyphosphate, aluminum hydroxide, and intercalated graphite, estimated by comparing the heating time of the metal plate, is 1.3 times higher than the known analog based on epoxy and 1.6 times higher than reactive fire-resistant coating on a styrene-acrylic basis of industrial production, tested under the same conditions. The application of the proposed optimized method allows to provide a comparative assessment of the efficiency of coatings, using as a criterion the time to reach the critical temperature (500 °C) on the reverse side of the metal plate.

Keywords: effectiveness of fire protection, method, reactive coating, testing, metal fire protection, building constructions

References

1. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. Journal of Constructional Steel Research. 162, 105712. doi: 10.1016/j.jcsr.2019.105712

2. Gravit, M., Gumenyuk, V., Sychov, M., Nedryshkin, O. (2015). Estimation of

the pores dimensions of intumescent coatings for increase the fire resistance of building structures. Procedia engineering, 117, 119–125. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.132

3. Novak, S. V., Drizd, V. L., Dobrostan, O. V. (2018). Analiz sucasnih evropejs′kih metodiv ocinuvanna vognezahisnoji zdatnosti vognezahisnih materialiv dla budivel′nih konstrukcij. Naukovij visnik: civil′nij zahist ta pozezna bezpeka, 1(5), 74–85. Available at: https://firesafety.at.ua/Visnyk_new/N1_2018/10_novak_dobrostan.pdf

4. Zahist vid pozezi. Vognezahisni pokritta dla budivel′nih nesucih metalevih konstrukcij. Metod viznacenna vognezahisnoi zdatnosti: DSTU B V.1.1-17:2007 (ENV 13381-4:2002, NEQ). (2007). Kyiv: Minregionbud Ukraini (Last accessed: 19 May 2022). Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=41506

5. Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members – Part 8: Applied reactive protection to steel members: EN 13381-8:2013. (2013). Brussels: European committee for standardization. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/df0cdd6b-9ef2-47fc-874b-414ae34aa5cc/en-13381-8-2013

6. Boris, O. P., Polovko, A. P., Uz′kiv, T. B. (2012). Ekspres-metodika ocinuvanna vognezahisnoji zdatnosti vognezahisnih materialiv. Naukovij visnik UkrNDIPB, 2(26), 95–99. Available at: https://firesafety.at.ua/visnyk/2012_No_2-26/15-Boris_Uz_kiv.pdf

7. Andronov, V. A., Ribka, E. O. (2012). Porivnanna vognezahisnoji zdatnosti reaktivnih pokrittiv OVK, ENDOTERM 40202 ta ENDOTERM HT-150 za riznih svidkostah nagrivu. Naukovij visnik UkrNDIPB, 2(26), 1–7. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/461/1/24.pdf

8. Wang, Y., Goransson, U., Holmstedt, G., Omrane, A. (2005). A model for prediction of temperature in steel structure protected by intumescent coating, based on tests in the cone calorimeter. Fire Safety Science, 8, 235–246. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Yong-Wang-115/publication/240821850_A_Model_For_Prediction_Of_Temperature_In_Steel_Structure_Protected_By_Intumescent_Coating_Based_On_Tests_In_The_Cone_Calorimeter/links/5645fe6d08ae9f9c13e72cbf/A-Model-For-Prediction-Of-Temperature-In-Steel-Structure-Protected-By-Intumescent-Coating-Based-On-Tests-In-The-Cone-Calorimeter.pdf

9. Zahist vid pozezi. Vognezahisne obroblanna budivel′nih konstrukcij. Zagal′ni vimogi ta metodi kontroluvanna: DSTU-N-P B V.1.1-29:2010. (2011). Kyiv: Ministerstvo regional′nogo rozvitku ta budivnictva Ukraini. Available at: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26657

10. Silveira, M. R. D., Peres, R. S., Moritz, V. F., Ferreira, C. A. (2019). Intumescent coatings based on tannins for fire protection. Materials Research, 22(2). e20180433. doi: 10.1590/1980-5373-MR-2018-0433

11. Hryhorenko, O., Zolkina, Y., Saienko, N. V., Popov, Y. V. (2021). Investigation of the Effect of Fillers on the Properties of the Expanded Coke Layer of Epoxyamine Compositions. In Materials Science Forum, 1038, 539–546. Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.539

12. Jakovleva, R. A., Fomin, S. L., Safonov, N. A., Bezuglyj, A. M. (2008). Novye ognezasitnye pokrytia po metallu i identifikacia ih teplofiziceskih svojstv. Naukovij visnik budivnictva, 48, 250–268.

Надійшла до редколегії: 02.03.2024
Прийнята до друку: 13.04.2024

© О. М. Григоренко, Н. В. Саєнко, Є. С. Золкіна, В. О. Липовий

УДК 614.8

С. М. Шахов, *PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-9161-1696)*
С. А. Виноградов, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-2569-5489)*
А. С. Мельниченко, *PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-7229-6926)*
Д. І. Савельєв, *к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0002-4310-0437)*
В. О. Семків, *ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1584-4754)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ЛЮДЕЙ ПІД ЧАС ПОВІТРЯНОЇ ТРИВОГИ

Об'єктом дослідження є тривалість евакуації у разі повітряної тривоги до укриття на прикладі об'єкта з масовим перебуванням людей, що розміщений у прифронтовому регіоні. Незважаючи на значну кількість досліджень присвячених евакуації, переважна частина з них розглядалась саме при виникненні пожеж. Відповідно до цього надавались рекомендації щодо підвищення ефективності евакуації за допомогою різноманітних способів. Але досі не розглядалось питання тривалості руху людей до укриття під час ракетної загрози за сигналом повітряна тривога. Розроблено 3-D модель будівлі, що розташована в прифронтовому регіоні відповідно до об'ємно-планувальних рішень. Проаналізовано джерела відкритої інформації щодо кількості обстрілів регіону, де знаходиться об'єкт. Станом на кінець 2023 року зареєстровано 47 випадків. Середній час підльоту ракет до міста, де розміщено об'єкт, складає 30–40 с. Згідно з цим встановлено критерії безпечного часу, що необхідний для досягнення укриття. При розміщенні людей на 1–6 му поверсі тривалість евакуації до укриття становить 92,8 с, при швидкості руху 1,66 м/с. У цьому випадку лише 33 %, а саме 40 людей встигають дістатися укриття за 40 с. Решті 67 %, а саме 81 людини необхідно ще 52,8 с, щоб встигнути дістатися безпечного місяця у разі загрози ракетної небезпеки під час сигналу повітряна тривога. Оптимізовано місця розміщення людей у приміщеннях об'єкта з масовим перебуванням людей та надано рекомендації щодо швидкості руху до укриття. Належне забезпечення своєчасної евакуації залежить від швидкості руху та місця знаходження людей на поверхах будівлі. Для даного об'єкту оптимальним рішенням, яке забезпечує збереження життя 95 % людей від загальної кількості є негайний відгук на сигнал тривоги, заборона розміщення людей вище за 1-й поверх, та рух зі швидкістю не менше ніж 8 км/год.

Ключові слова: евакуація, укриття, споруди цивільного захисту, повітряна тривога, Path Finder, PyroSim

1. Вступ

24 лютого 2022 року на території України було зареєстровано надзвичайну ситуацію (НС) військового характеру. Протягом останніх двох років питання забезпечення безпеки громадян стає не тільки актуальним, але й вельми критичним, зокрема на об'єктах з масовим перебуванням людей.

Належний рівень безпеки цивільних в умовах воєнного стану, зокрема під час загрози ракетних обстрілів, досягається шляхом забезпечення будівель, де знаходяться люди, спорудами цивільного захисту, до яких відносять і укриття.

До споруд цивільного захисту висуваються певні будівельні вимоги, за рахунок яких мінімізується можливість ураження цивільного населення при ракетних обстрілах. Також розробляються заходи з метою забезпечення належних умов тимчасового, у тому числі довгострокового перебування людей в укриттях. Система виявлення загрози ракетних обстрілів дозволяє попередити цивільних осіб про можливу небезпеку за рахунок сигналів повітряної тривоги.

Залежно від місця знаходженні області або міста на території країни, необхідна різна тривалість часу для досягнення укриття. Натурні дослідження цього питання на сьогодні не можливі, що зумовлено реаліями загрози життю та здоров'ю, але альтернативними інструментами є сучасні програмні продукти для моделювання евакуації.

За рахунок таких програмних продуктів на існуючих об’єктах з масовим перебуванням людей є змога досліджувати процес евакуації за сигналом повітряної тривоги та розробляти певні заходи та рішення, спрямовані на підвищення безпеки у разі ракетної загрози.

Таким чином, забезпечення безпеки людей під час повітряної тривоги є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Переважно питання тривалості евакуації з будівель з масовим перебуванням людей розглядалось при пожежах на різноманітних об’єктах.

У роботі [1] досліджено евакуацію на прикладі об’єкта охорони здоров’я під час пожежі. Обґрунтовано доцільність використання пожежних ліфтів. У результаті досліджень виявлено, що без застосування пожежних ліфтів загальний час евакуації становить 1112 с. У разі проведення евакуації із використанням пожежних ліфтів загальний час евакуації зменшується до 863 с. Питання забезпечення евакуації в разі виникнення сигналу повітряна тривога в роботі не розглядалось.

У роботі [2] проведено дослідження щодо моделювання евакуації з торгового комплексу під час пожежі. Встановлено взаємозв’язок між часом та виникненням скупчень на певних ділянках евакуації. Автори розділяють загальну тривалість евакуації на три етапи. Перша стадія становить 0–600 с, що є періодом швидкого зростання, і зв’язок між кількістю евакуйованих і часом має позитивну пропорційність. Швидкість евакуації в цей період висока, і більша частина евакуації завершена, але серйозні затори виникають на деяких виходах протягом 30–480 с цього етапу. Друга стадія – це 600–800 с, яку можна описати як період повільного росту, оскільки в цей час швидкість евакуації починає значно зменшуватися. Третій етап – після 800 с. Швидкість евакуації зростає повільно порівняно з попередньою, і значно знижується у частині евакуаційних сходів. Авторами не проведено жодних досліджень чи висновків щодо застосування такого методу при евакуації під час повітряної тривоги.

Авторами [3] досліджено параметри евакуації з приміщення театру з одночасним моделюванням пожежі. Виявлено зв’язок між блокуванням шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Однак авторами не розглядалась евакуація людських потоків в разі отримання сигналу про повітряну тривогу з обмеженим безпечним часом.

У роботі [4] досліджено швидкість зміни температури, видимості, висоти диму та теплового потоку на прикладі промодельованої пожежі в гуртожитку. Досліджено тривалість евакуації в умовах горіння обраної пожежної навантаги. У результаті надано рекомендації щодо мінімальної ширини вихідних дверей, яка повинна бути не менше 3 м, а ширина сходів – не менше 1,75 м. Однак такий підхід і отримані результати не можуть бути застосовані при евакуації за сигналом тривога через різні безпечні часи у випадку пожежі та у випадку загрози ракетного обстрілу.

Авторами [5] досліджено тривалість евакуації при пожежі на прикладі приміщення будівлі університету. Визначено час блокування евакуаційних шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі. У результаті надано рекомендації, щодо підвищення рівня пожежної безпеки шляхом встановлення систем протипожежного захисту, які натомість не несуть практичної цінності у випадку евакуації за сигналом тривога.

 © С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

У роботі [6] досліджено процес евакуації з житлової будівлі в умовах пожежі. Авторами порівняно різні стратегії руху та їх вплив на загальну тривалість евакуації. Встановлено, що на 400 с, видимість на евакуаційному виході панельної квартири нижче 5 м, а блокування шляхів та евакуаційних виходів відбувається на 360 с. При першому сценарії визначено, що загальний час евакуації склав 398,7 с. При повторному моделюванні зі зміною стратегії руху встановлено, що час необхідний для евакуації становить 355,2 с, що відповідає вимогам належного рівня пожежної безпеки об'єкта. Недоліком роботи є те, що авторами розглянуто житлову будівлю, об'ємно-планувальні рішення якої відрізняються від типових об'ємно-планувальних рішень об'єкта з масовим перебуванням людей. До того ж питання евакуації за сигналом тривога в роботі не розглядались.

Авторами [7] проведено дослідження щодо евакуації з виробничого цеху, із моделюванням горіння пожежної навантаги. У роботі розглянуто час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. За існуючої схемою евакуації блокування евакуаційних виходів спостерігалося раніше, ніж остання людина встигала залишити виробничий цех. У результаті автори пропонують посилити навчання з питання стратегій руху людей. Однак треба зазначити, що рух людських потоків при евакуації з типового виробничого приміщення суттєво відрізняється від руху людських потоків при евакуації з будівлі з масовим перебуванням людей, тому отримані результати не можуть бути застосовані у випадку евакуації з таких будівель. Ще одним недоліком є те, що автори не враховували евакуацію у разі загрози ракетного обстрілу, а лише у випадку пожежі.

Авторами [8] як типове громадське місце при моделюванні евакуації обрано університетську бібліотеку з пожежним навантаженням. У результаті встановлено, що тривалість евакуації становив 739 с. За допомогою управління стратегією евакуації цей час був скорочений до 638 с, що ефективніше на 13,67 %. Автори стверджують, що ефективність евакуації можна значно підвищити шляхом збільшення вказівок щодо трансляції, додавання знаків, розширення сходів та інших пропозицій щодо оптимізації. Однак такий підхід не може бути застосований у випадку евакуації за сигналом повітряна тривога, оскільки безпечний час у такому випадку критично малий і на нього не можуть вплинути більшість із запропонованих заходів.

У [9, 10] виявлено основні проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами та сучасний стан питання евакуації маломобільних груп населення з висотних житлових будинків при пожежі. Питання евакуації маломобільних груп у випадку загрози ракетного обстрілу авторами в роботі не розглядалось.

Незважаючи на значну кількість досліджень присвячених евакуації, переважна частина з них розглядалась саме при виникненні пожеж. Відповідно до цього надавались рекомендації щодо підвищення ефективності евакуації за допомогою різноманітних способів. Але досі не розглядалось питання тривалості руху людей до укриття під час ракетної загрози за сигналом повітряна тривога.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність даних щодо тривалості руху людей до укриття під час тривоги.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є підвищення рівня безпеки людей під час повітряної тривоги на прикладі об'єкта з масовим перебуванням людей.

Для досягнення мети були поставленні наступні завдання:

– дослідити тривалість евакуації за сигналом повітряна тривога до укриття на прикладі об'єкта з масовим перебуванням людей;

– оптимізувати місця розміщення людей у приміщеннях об'єкта з масовим перебуванням людей та надати рекомендації щодо швидкості руху до укриття.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – тривалість евакуації у разі повітряної тривоги до укриття.

Предмет дослідження – вплив швидкості руху та місця розміщення людей на тривалість евакуації до укриття.

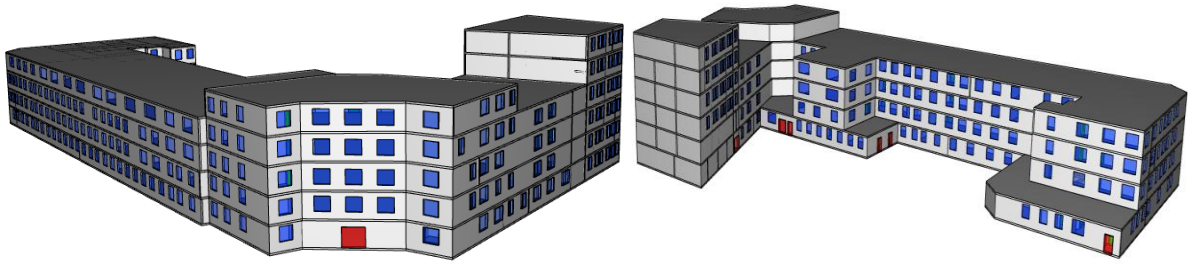
Основна гіпотеза полягає в тому, що при знаходженні людей на об'єктах з масовим перебуванням людей у прифронтових регіонах є загроза безпеці, у томи числі із наявним укриттям в будівлі.

Дослідження проводили методом моделювання із використанням програмних забезпечень PyroSim та PathFinder (країна походження США).

5. Результати підвищення рівня безпеки людей під час повітряної тривоги

5.1. Результати дослідження тривалості руху людей до укриття під час тривоги

Як модель об'єкта з масовим перебуванням людей обрано будівлю закладу освіти, розташованого у прифронтовому регіоні. Модель будівлі розроблено у програмному забезпеченні PyroSIM відповідно до існуючих об'ємно-планувальних рішень. Загальний вигляд створеної моделі будівлі подано на рис. 1.



а) **б)**

Рис. 1. Загальний вигляд створеної моделі будівлі: а) фронтальний вигляд; б) вигляд корпусу із внутрішнього двору

У будівлі передбачено укриття, що розташовано у підвальному поверсі. Шляхи до укриття з будівлі пролягають через три сходових клітини (рис. 2).

Рис. 2. Сходові клітини, що ведуть до укриття, розміщеного у підвальному поверсі

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

Кількість входів до укриття – три, серед яких два розміщено ззовні будівлі та один з середини.

За аналізом попередньої інформації було визначено кількість, місце розміщення та параметри агентів для моделювання, що подано у табл. 1.

Табл. 1. Параметри агентів евакуації [11]

Характеристика людей	
Категорія М1	люди без обмежень по здоров'ю
Швидкість руху, м/с	1,66
Площа горизонтальної проекції, м^2	0,125 (зимовий одяг)
Кількість людей	
1 поверх (група № 1)	31
2 поверх (група № 2)	33
3 поверх (група № 3)	27
4 поверх (група № 4)	19
5 поверх (група № 5)	7
6 поверх (група № 6)	4
Загальна кількість	121 особа
Укриття	
Вхід № 1	Зсередини будівлі, під сходами у 6-ти поверхової будівлі
Вхід № 2	Ззовні будівлі, вхід із внутрішнього двору
Вхід № 3	Ззовні будівлі, вхід із внутрішнього двору
Характеристика стратегій руху	
1.	Рух будь-якими маршрутами до найближчого входу в укриття

Місце розміщення агентів у приміщеннях на поверхах корпусу подано на рис. 3.

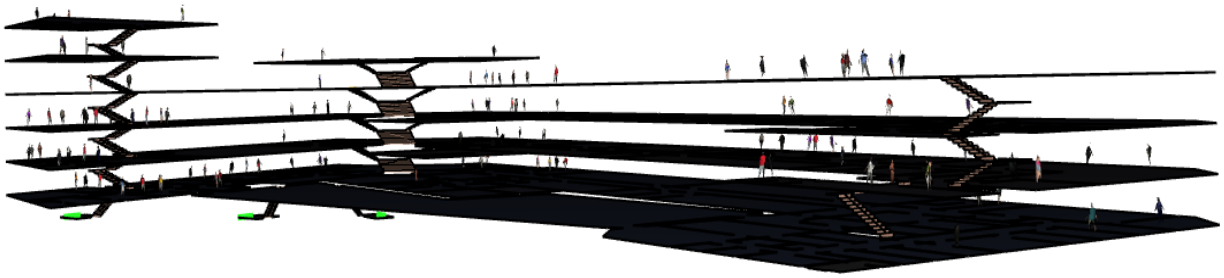


Рис. 3. Місце розміщення агентів у приміщеннях на поверхах корпусу

За інформацією з відкритих інтернет-джерел у табл. 2 подано кількість обстрілів регіону з оголошенням сигналу «повітряна тривога» ракетами із влучанням в цивільні об'єкти.

Найчастіше у досліджуваному регіоні атаки завдаються ракетами типу С-300/400. Як критерій часу безпечної евакуації було використано час «підльоту» такого типу ракет, який відповідно складає 30–40 с.

Слід зауважити, що обмеженням даного дослідження є відсутність впливу людського чинника, а саме час «відгуку» на сигнал повітряної тривоги. Зроблено

припущення, що всі люди свідомо реагують, та починають рухатися одразу після отримання сигналу.

Табл. 2. Кількість обстрілів регіону за 2022-2023 рік [12]

2022 рік								Кількість
Липень	14.07	27.07	30.07	31.07				4
Серпень	03.08	06.08	07.08	12.08	18.08	19.08	28.08	7
Вересень	02.09	03.09	04.09	06.09	11.09			5
Жовтень	04.10	08.10	13.10	31.10				4
Листопад	03.11	13.11	15.11	18.11				4
Грудень	22.12	29.12						2
2023 рік								
Січень	14.01	29.01						2
Лютий	05.02	07.02	10.02	11.02	16.02	22.02		6
Березень	09.03	15.03	31.03					3
Квітень	22.04							1
Травень	14.05							1
Червень	24.06							1
Липень	31.07							1
Вересень	16.09	21.09						2
Листопад	12.11							1
Грудень	08.12	20.12	29.12	30.12				4
Загальна кількість ударів								
47								
Тип ракет	C/300–400							
Час підльоту	30–40 с							

На рис. 4 подано результати дослідження тривалості евакуації за сигналом «повітряна тривога» з урахуванням параметрів поданих у табл. 1.

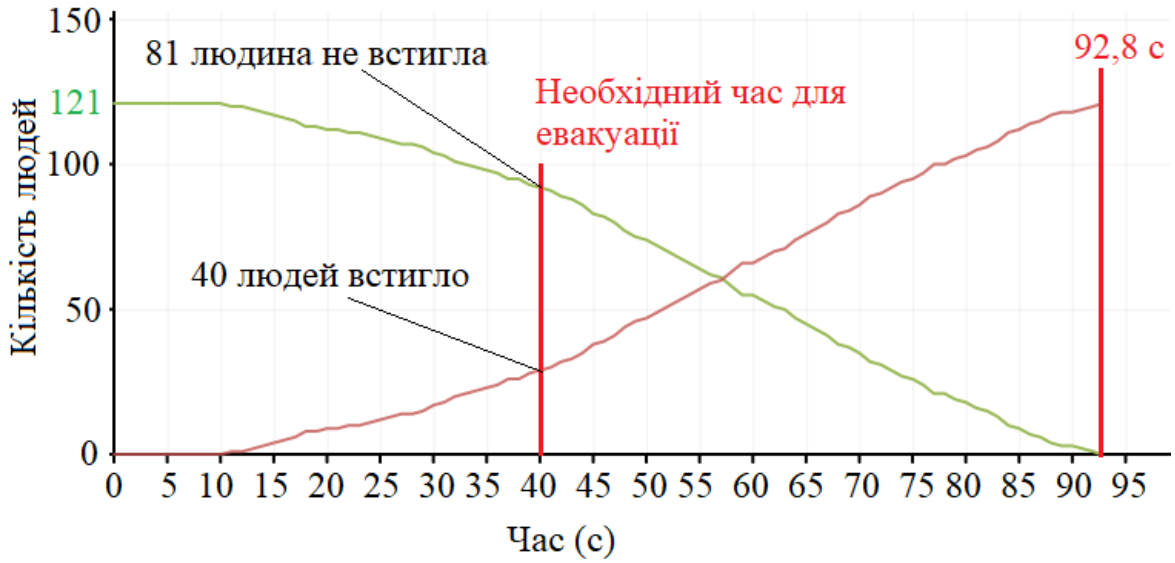


Рис. 4. Час евакуації до укриття за сигналом повітряної тривоги

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

Наступним кроком є моделювання евакуації людей при різній інтенсивності руху та розміщенні у приміщеннях з таким чином, щоб забезпечити своєчасне досягнення укриття.

5.2. Оптимізація розміщення людей та рекомендації щодо швидкості руху до укриття

Враховуючи важливість необхідності потрапляння в укриття, зроблено припущення, що люди будуть рухатися зі швидкістю середнього бігу для людини, а саме 8 км/г, що становить 2,21 м/с, але лише по горизонтальних шляхах евакуації. Для сходів униз швидкість залишається 1,66 м/с. Результати подано на рис. 5.

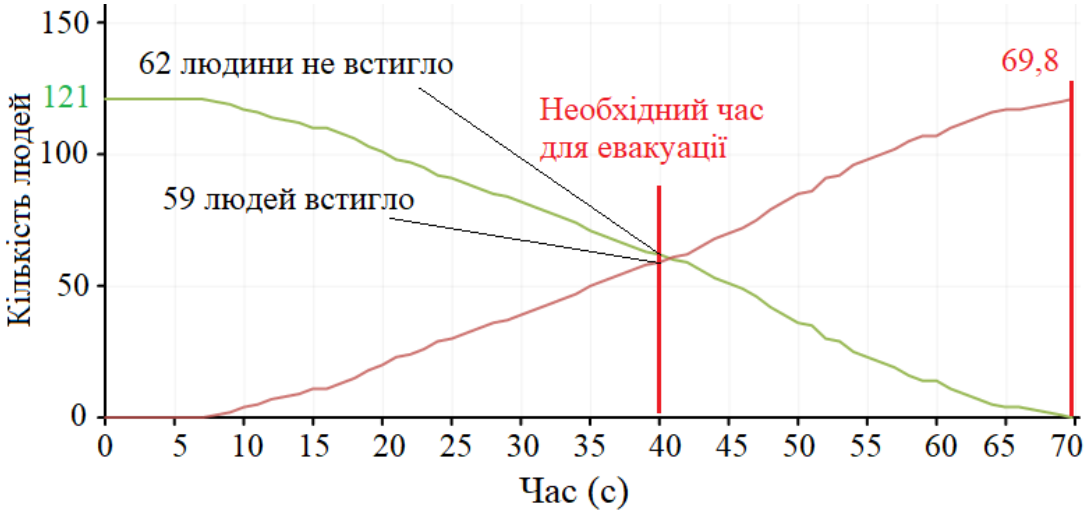


Рис. 5. Тривалість руху до укриття зі збільшенням швидкості руху до 2,21 м/с

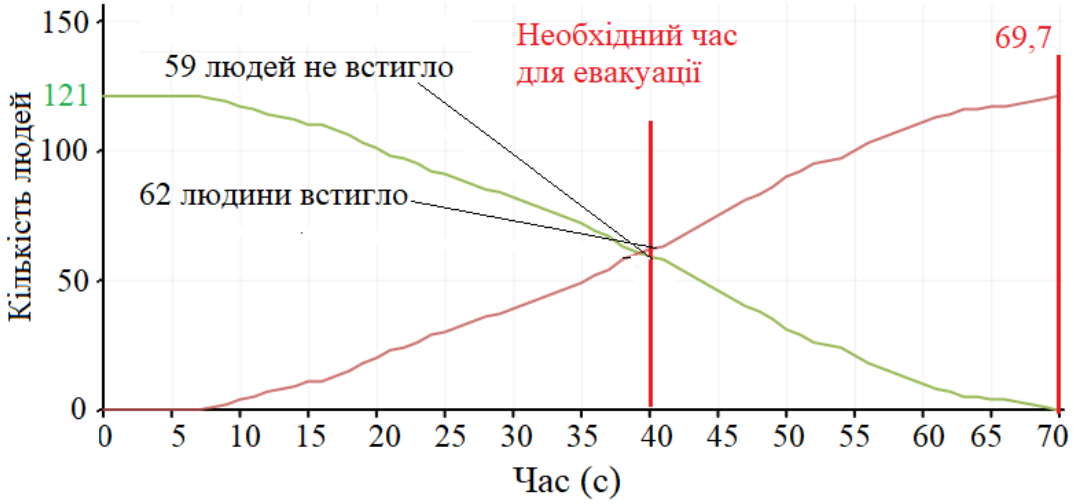


Рис. 6. Тривалість руху до укриття при розташуванні людей на 1–4 поверсі зі швидкістю руху 2,21 м/с

На рис. 7 подано залежність часу евакуації у разі розміщення людей на 1–3 поверсі.

На рис. 8 подано залежність часу евакуації у разі розміщення людей на 1–2 поверсі.

На рис. 9 подано залежність часу евакуації у разі розміщення людей тільки на поверсі.

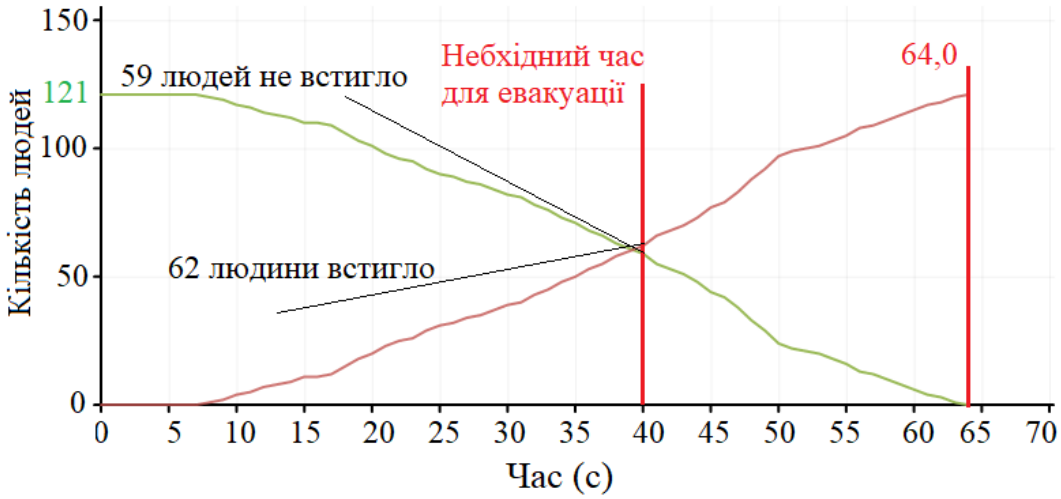


Рис. 7. Час руху до укриття при розташуванні людей на 1-3 поверсі зі швидкістю руху 2,21 м

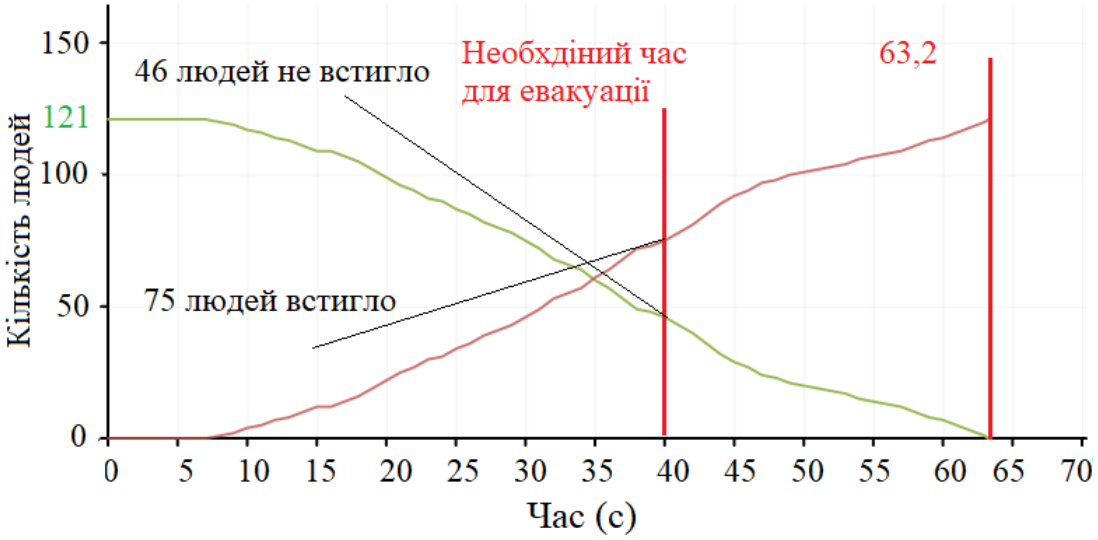


Рис. 8. Час руху до укриття при розташуванні людей на 1-2 поверсі зі швидкістю руху 2,21 м

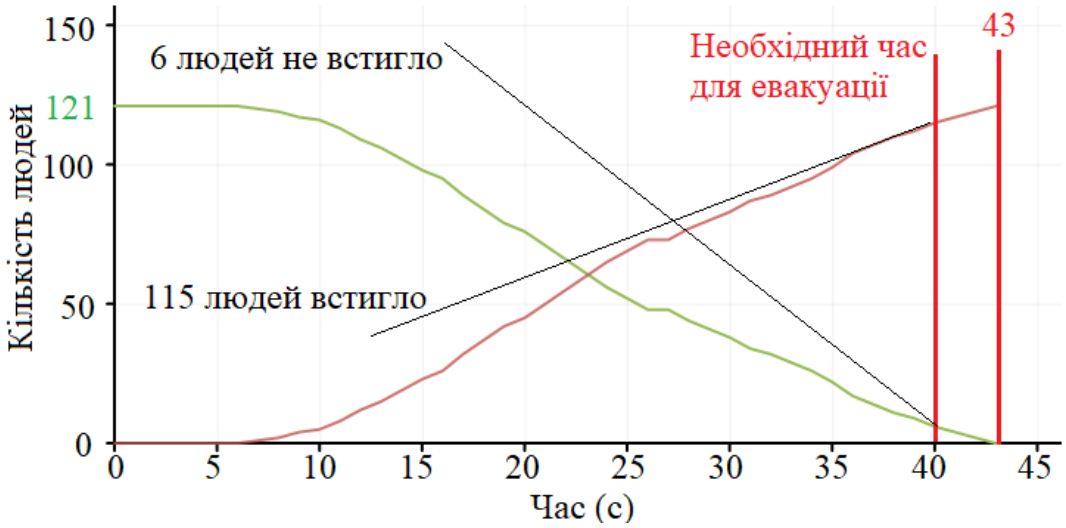


Рис. 9. Час руху до укриття при розташуванні людей на 1 поверсі зі швидкістю руху 2,21 м

Зведені результати дослідження подано у табл. 3.

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

Табл. 3. Результати дослідження часу евакуації при зміні швидкості та розташуванні агентів на поверхах

Отримані результати		Час евакуації, с	% евакуйованих за 40 секунд
Без пропозицій		92,8	33 %
Пропозиції			
№ 1	V=2,21 м/с	69,8	49 %
№ 2	Всі особи знаходяться на 1–5 поверсі	69,8	
№ 3	Всі особи знаходяться на 1–4 поверсі	69,7	51 %
№ 4	Всі особи знаходяться на 1–3 поверсі	64,0	
№ 5	Всі особи знаходяться на 1–2 поверсі	63,2	62 %
№ 6	Всі особи знаходяться на 1 поверсі	43,0	95 %

Отже, за результатами моделювання евакуації під час повітряної тривоги встановлено оптимальну швидкість руху та місце розміщення людей в будівлі, за яких 95 % від кількості осіб встигають потрапити в укриття за сигналом повітряна тривога.

6. Обговорення результатів підвищення рівня безпеки людей під час повітряної тривоги

Аналізуючи результати (рис. 4) при розміщенні людей на 1–6 поверсі, загальний час евакуації склав 92,8 с, при швидкості руху 1,66 м/с. Виявлено, що лише 33 %, а саме 40 людей встигають дістатися укриття за 40 с. Решті 67 %, а саме 81 людині необхідно ще 52,8 с, щоб встигнути дістатися безпечного місяця у разі загрози ракетної небезпеки під час сигналу повітряна тривога.

При підвищенні швидкості руху до 2,21 м/с загальний час евакуації (рис. 5) склав 69,8 с. При цьому встигає евакуюватись на 15 осіб більше за 40 с, що складає 48 %. Решта 52 %, а саме 62 людині необхідно ще 39 с, щоб встигнути дістатися безпечного місяця у разі загрози ракетної небезпеки. Загалом час евакуації знижується на майже на 25 %.

При розміщенні людей на 1–5 – му поверсі результати тривалості евакуації не змінилися. Також виявлено (рис. 6), що не має впливу на загальний час евакуації переміщення людей з 5 та 6 поверху на нижче розташовані поверхи. Різниця лише полягає у підвищенні кількості людей, що встигають дістатися укриття на 40 с, але не суттєва, лише на 3 особи більше.

При розміщенні людей тільки на 1–3 поверсі час евакуації (рис. 7) становить 64 с, що на майже на 6 с нижче за час, який потрібен для евакуації у разі розміщення людей на 1–4/1–5/1–6 – му поверхах. На 40 с змін щодо кількості людей, що встигають евакуюватись, у порівняні з кількістю евакуйованих при розміщенні на 1–4 – му поверсі не зафіксовано.

Розміщення людей на 1–2 поверсі, суттєво не впливає на загальний час евакуації (рис. 8) у порівнянні з часом, при розміщенні людей на 1–3 поверсі. Але суттєво впливає на кількість людей, що встигають евакуюватись, а саме на 13 людей більше у порівнянні із кількістю, що встигає дістатися укриття при русі з 1–3 поверху.

За результатами встановлено, що найкоротший час евакуації до укриття забезпечено при розміщенні людей на 1 поверсі (рис. 9), але все одно не забезпечено потрапляння усіх людей до укриття за 40 с. Зокрема встигає потрапити до укриття 115 людей, що на 40 більше, у порівнянні із кількістю, що була зафіксована при розміщенні людей на 1–2 поверсі. Не встигає евакуюватися лише 6 осіб.

Такі результати евакуації можна пояснити об'єктивними обставинами: малим необхідним часом евакуації та довжиною шляху евакуації у випадку 6-ти поверхової будівлі.

У цьому дослідженні вперше досліджено евакуацію з будівлі з масовим перебуванням людей у випадку отримання сигналу про повітряну тривогу з часом евакуації 40 с. Як обмеження проведеного дослідження слід враховувати, що відгук на сигнал повітряної тривоги відбувався без затримки. У моделюванні агенти розпочинали рух одночасно, одразу за сигналом. Однак в реальності сигнал про повітряну тривогу часто поступає не в момент вильоту ракети, а вже в процесій її польоту, або після першого ракетного влучання по місту. Тому подальші дослідження будуть направлені на встановлення «часу відгуку» на сигнал повітряної тривоги та врахування цього часу при таких дослідженнях.

7. Висновки

1. Досліджено тривалість евакуації за сигналом повітряна тривога до укриття на прикладі об'єкта з масовим перебуванням людей. Розроблено 3-D модель будівлі, що розташований в прифронтовому регіоні відповідно до об'ємно-планувальних рішень. Проаналізовано джерела відкритої інформації, щодо кількості обстрілів регіону, де знаходиться об'єкт. Станом на кінець 2023 року зареєстровано 47 випадків. Середній час підльоту ракет до міста, де розміщено об'єкт, складає 30–40 с. Згідно з цим встановлено критерії безпечного часу, що необхідний для досягнення укриття. При розміщенні людей на 1–6 му поверсі тривалість евакуації до укриття становить 92,8 с, при швидкості руху 1,66 м/с. У цьому випадку лише 33 %, а саме 40 людей встигають дістатися укриття за 40 с. Решті 67 %, а саме 81 людині необхідно ще 52,8 с, щоб встигнути дістатися безпечного місяця у разі загрози ракетної небезпеки під час сигналу повітряна тривога.

2. Оптимізовано місця розміщення людей у приміщеннях об'єкта з масовим перебуванням людей та надано рекомендації щодо швидкості руху до укриття. Виявлено наступне:

– при швидкості руху 2,21 м/с та розміщенні на 1–5 та 1–6 поверсі до укриття не встигає потрапити 62 людини, що складає 51 % від загальної кількості людей;

– при швидкості руху 2,21 м/с та розміщенні на 1–3 та 1–4 поверсі до укриття не встигає потрапити 59 людей, що складає 49 % від загальної кількості людей;

– при швидкості руху 2,21 м/с та розміщенні на 1–2 поверсі до укриття не встигає потрапити 46 людей що складає 38 % від загальної кількості людей;

– при швидкості руху 2,21 м/с та розміщенні на 1 поверсі до укриття не встигає потрапити 6 людей що складає 5 % від загальної кількості людей.

Отже, належне забезпечення своєчасної евакуації залежить від швидкості руху та місця знаходження людей на поверхах будівлі. Для даного об'єкту оптимальним рішенням, яке забезпечує збереження життя 95 % людей від загальної кількості є негайний відгук на сигнал тривоги, заборона розміщення людей вище за 1 поверх, та рух зі швидкістю не менше ніж 8 км/год.

Література

1. Hui Z., Hao-cheng L. Simulation of Evacuation in Crowded Places Based on BIM and Pathfinder. J. Phys. 2021. Conf. Ser. 1880 012010. P. 1–10. doi:10.1088/1742-6596/1880/1/012010

2. Jiuju L., Shuhan L. Pathfinder-Based Simulation and Optimization of Evacuation of Large Commercial Complexes. Journal of Building Construction and Planning Research. 2023. Vol. 11(2). P. 27–35. doi: 10.4236/jbcpr.2023.112002

 © С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

3. Hui Z. Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder. J. Phys. 2022. Conf. Ser. 2289 012017. P. 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2289/1/012017

4. Xinfeng L., Xueqin Z., Bo L. Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, Journal of the Chinese Institute of Engineers. 2017. Vol. 40(3). P. 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072

5. Ming-xin L., Shun-bing Z., Jing-hong W., Zheng Z. Researchon Fire Safety Evacuationina University Libraryin Nanjing. Procedia Engineering. 2018. Vol. 211. P 372–378. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.025

6. Mufeng X., Xihua Z., Xinxin P., Yanan W. Simulation of emergency evacuation from construction site of prefabricated buildings. Scientifc Reports. 2022. 12:2732. P. 1–18. doi: 10.1038/s41598-022-06211-w

7. Liu Q., Zhao D., Yang H. Research on emergency evacuation of workshop based on PyroSim and Pathfinder. Fire Science and Technology. 2020. Vol. 39(7). P. 927–930. URL: https://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/927

8. Heng H., Zhang S., Zhu J., Zhu Z. Evacuation in Buildings Based on BIM: Taking a Fire in a University Library as an Example. Int. J. Environ. Res. Public Health. 2022. Vol. 19(3). P. 23–32. doi: 10.3390/ijerph192316254

9. Хлевной О. В., Харижин Д. Ю., Назаровець Д. В. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами. Пожежна безпека. 2020. №37. С. 72–76. doi: 10.32447/20786662.37.2020.11

10. Maiboroda P., Otrosh Yu., Rashkevich H. and Melezhyk P. Assessment of the fire resistance of buildings from fireproof reinforced concrete building structures. Municipal economy of cities. 2023. № 4(178). 219–231. doi: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231

11. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Зі змінами № 1 [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf

12. Перелік наземних ударів з С-300/С-400 під час російського вторгнення. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Perelik nazemnykh udariv z S-300/S-400 pid chas rosiiskoho vtorhnennia

S. Shakhov, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
S. Vinogradov, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
A. Melnychenko, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
D. Saveliev, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
V. Semkiv, *Adjunct*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

INCREASING THE LEVEL OF PEOPLE'S SAFETY DURING AN AIR ALARM

The object of the study is the duration of evacuation in the event of an air alarm to shelter on the example of an object with a mass presence of people located in the front-line region. Despite a significant number of studies devoted to evacuation, the majority of them were considered in the event of fires. In accordance with this, recommendations were given to increase the efficiency of evacuation using various methods. However, the issue of the duration of people's movement to shelter during a missile threat following an air warning signal has not yet been considered. A 3-D model of the building located in the front-line region was developed in accordance with spatial planning decisions. The sources of open information on the number of shelling in the region where the object is located were analyzed. As of the end of 2023, 47 cases were registered. The average time of approach of missiles to the city where the object is located is 30–40 seconds. According to this, the criteria for the safe time

required to reach the shelter are established. When people are placed on the 1st-6th floors, the duration of evacuation to the shelter is 92,8 seconds, at a speed of movement of 1.66 m/s. In this case, only 33 %, namely 40 people manage to reach the shelter in 40 seconds. The remaining 67 %, namely 81 people, need another 52,8 seconds to reach a safe moon in case of a missile threat during an air alert. Places of placement of people in the premises of the object with a mass stay of people were optimized and recommendations were given regarding the speed of movement to the shelter. Proper provision of timely evacuation depends on the speed of movement and the location of people on the floors of the building. For this object, the optimal solution, which ensures the preservation of the lives of 95 % of people from the total number, is an immediate response to an alarm signal, a ban on placing people higher than 1 floor, and movement at a speed of at least 8 km/h.

Keywords: evacuation, shelter, civil defense facilities, air alarm, PathFinder, PyroSim

References

1. Hui, Z., Hao-cheng, L. (2021). Simulation of Evacuation in Crowded PlacesBased on BIM and Pathfinder. J. Phys. Conf. Ser, 1880 012010, 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1880/1/012010

2. Jiuju, L., Shuhan, L. (2023). Pathfinder-Based Simulation and Optimization of Evacuation of Large Commercial Complexes. Journal of Building Constructionand Planning Research, 11(2), 27–35. doi: 10.4236/jbcpr.2023.112002

3. Hui, Z. (2022). Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder. J. Phys. Conf. Ser, 2289, 012017, 1–8. doi: 10.1088/1742-6596/2289/1/012017

4. Xinfeng, L., Xueqin, Z., Bo, L. (2017). Numerical simulation of dormitory building fire and personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder, Journal of the Chinese Institute of Engineers, 40(3), 257–266. doi: 10.1080/02533839.2017.1300072

5. Ming-xin, L., Shun-bing, Z., Jing-hong, W., Zheng, Z. (2018). Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing. Procedia Engineering, 211, 372–378. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.025

6. Mufeng, X., Xihua, Z., Xinxin, P., Yanan, W. (2022). Simulation of emergency evacuation from construction site of prefabricated buildings. Scientifc Reports, 12:2732, 1–18. doi: 10.1038/s41598-022-06211-w

7. Liu, Q., Zhao, D., Yang, H. (2020). Research on emergency evacuation of workshop based on PyroSim and Pathfinder. Fire Science and Technology, 39(7), 927–930. Available at: https://www.xfkj.com.cn/EN/Y2020/V39/I7/927

8. Heng, H., Zhang, S., Zhu, J., Zhu, Z. (2022). Evacuation in Buildings Basedon BIM: Taking a Fire in a University Library as an Example. Int. J. Environ. Res. Public Health, 19(3), 23–32. doi: 10.3390/ijerph192316254

9. Khlevnoy, O., Kharyshyn, D., Nazarovets, O. (2020). Problem issues of evacuation time calculation during firesin preschool and secondary education institutions with inclusive groups. Fire Safety, 37, 72–76. doi: 10.32447/20786662.37.2020.11

10. Maiboroda, P., Otrosh, Ю., Rashkevich, H., Melezhyk, P. (2023). Assessment of the fire resistance of buildings from fireproof reinforced concrete building structures. Municipal economy of cities. 4, 178, 219–231. doi: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-219-231

11. DSTU 8828:2019. Fire safety. General principles. Access mode: Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf

12. Perelik nazemnykh udariv z S-300/S-400 pid chas rosiiskoho vtorhnennia. Rezhym elektronnoho dostupu: Available at: https://uk.wikipedia.org/wiki/Perelik nazemnykh udariv z S-300/S-400 pid chas rosiiskoho vtorhnennia

Надійшла до редколегії: 02.03.2024
Прийнята до друку: 15.04.2024

 © С. М. Шахов, С. А. Виноградов, А. С. Мельниченко, Д. І. Савельєв та ін.

УДК 614.8

С. І. Зімін, *н.с. відділу (ORCID 0000-0003-0514-2238)*
К. А. Афанасенко, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

КОЕФІЦІЄНТ ТЕПЛОВІДДАЧІ ФАКЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ЗА УМОВ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Запропоновано модель для дослідження температурних режимів факельних пристроїв біогазових комплексів на основі рівняння нестаціонарної теплопровідності. Незважаючи на загалом надзвичайно складне явище теплообміну, теплопередачі, тепловіддачі,при роботі факельного пристрою складаються такі умови, що дозволяють покладатись на відносно прості модельні описи, що може дозволити проводити оцінку ступеню небезпеки теплового випромінювання при його роботі. Побудовано та розглянуто розрахункову схему огороджувальної труби факельного пристрою із зазначенням розрахункових параметрів. Прийняті граничні умови першого роду на внутрішній і третього роду на зовнішній поверхні стінки кожуха труби факельного пристрою. Для побудови моделі були зроблені наступні припущення: температура на внутрішній стінці кожуха однакова і дорівнює температурі продуктів згоряння біогазу; в розрахунковій схемі не врахована теплопровідність через виробничу арматуру факельного пристрою; в процесі нагрівання геометричні параметри стінки кожуха не змінюються. Визначено, що коефіцієнт теплопередачі при використанні факельного пристрою для спалювання біогазу можна визначити з виразу по визначенню критерію подібності теплових процесів. При розрахунку у відповідності до отриманої моделі критерію подібності теплових процесів встановлено, що в залежності від температури зовнішнього середовища його значення можуть змінюватися в межах 10–24 %. При цьому геометричні параметри факельного пристрою мають суттєвіший вплив на вказані критерії – до 65 %. Отримані аналітичні залежності коефіцієнта тепловіддачі α від характерного геометричного розміру, а також від температури повітря і температури поверхні кожуха, що дозволяє визначити негативний тепловий вплив на оточуюче середовище. Показано, що його величина може змінюватися до 1000 % в залежності від лінійного розміру та температури поверхні кожуха.

Ключові слова: факельні системи, факельні труби, температура, теплове випромінювання, коефіцієнт тепловіддачі

1. Вступ

Підприємства, які відносяться до хімічного, нафто-хімічного, енергетичного комплексів, в технологічному процесі яких обертаються горючі гази, легкозаймисті та горючі рідини найчастіше (в залежності від технологічної схеми) в своєму складі мають факельні системи, які призначені для бездимного спалювання горючих та токсичних газів або парів в результаті їх періодичного, аварійного або постійного скидання [1, 2].

Аварійні ситуації на факельних системах можуть призвести до катастрофічних наслідків. Авторами було досліджено пожежну небезпеку аварійних ситуацій та її наслідки [3], а також можливість виникнення вибухів при аваріях та ступінь вибухонебезпеки факельних пристроїв [4].

Також в ході проведення модельного експерименту авторами показано [3], що при виході факельного пристрою на стаціонарний режим роботи, температура на поверхні огороджувальної труби факельного пристрою сягає високих значень, що може мати негативний вплив на сусідні об’єкти.

Враховуючи зазначене,попередження негативних наслідків НС внаслідок теплового впливу факельних пристроїв розглядається в якості однієї з актуальних проблем пожежної безпеки. Це, в свою чергу, обумовлює необхідність проведення досліджень параметрів теплопередачі при стаціонарному режимі роботи факельного пристрою для визначення його негативного впливу на сусідні об’єкти.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі проведено аналіз небезпеки роботи факельних систем та пристроїв у стаціонарному режимі роботи [3] на експериментальній установці (рис. 1), але при цьому, автори обмежились лише оцінкою температур при роботі на поверхні огороджувальної труби факельного пристрою, що не дає повної уяви про теплове випромінювання в оточуюче середовище та на сусідні об'єкти.

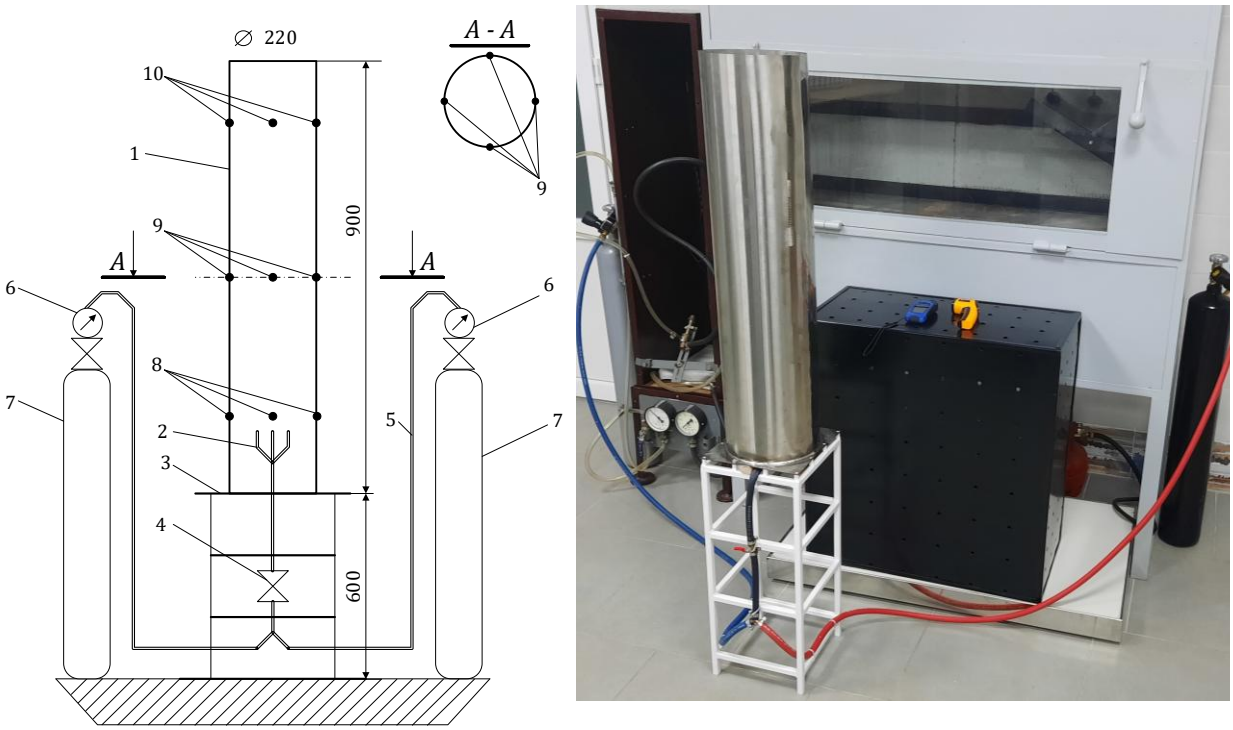


Рис. 1. Схема та зовнішній вигляд експериментальної установки: 1 – кожух факельного стовбуру; 2 – пальник; 3 – станина; 4 – кран; 5 – шлаги з'єднувальні; 6 – манометри-витратоміри; 7 – балони (вуглекислий газ та метан); 8 – точки контролю температури (нижній пояс); 9 – точки контролю температури (середній пояс); 10 – точки контролю температури (верхній пояс)

Аналіз отриманих експериментальних даних дозволяє говорити про негативний температурний вплив на сусідні об'єкти при нормальній експлуатації факельних пристроїв, оцінку якого необхідно провести.

Питання теплового випромінювання, його нормування та моделювання (розрахунок) його негативного впливу при роботі факельних установок та пристроїв розглядаються в нормативних та галузевих установчих документах України [5], Європи [6] та інших країн [7]. Але, при цьому, ВБН В.1.1-00013741-001:2008 [5] розглядає розрахунок параметрів теплового випромінювання лише для факельних пристроїв відкритого типу, що неможливо застосувати для закритих систем біогазових комплексів. Закордонні установчі документи [6, 7] моделюють параметри лише для великорозмірних пристроїв відкритого типу, які притаманні для підприємств нафтохімічної галузі і, окрім, конструктивних особливостей, у декілька десятків разів відрізняються за геометричними параметрами. Все це робить неможливим використання даних джерел для розгляду закритих факельних пристроїв та випромінювання від них.

В роботах [8, 9] розглянуті лише загальні питання теплового випромінювання, що потребує адаптації для моделювання негативного теплового впливу від

© С. І. Зімін, К. А. Афанасенко

факельних пристроїв. Так, ці принципи були використанні в роботах [10, 11]. Однак, в роботі [10] розглядалися оболонкові та трубчасті теплообмінники із рідкими теплоносіями, на відміну від робочої речовини факельного пристрою. В роботі [11] проводився аналіз та розрахунок параметрів тепловіддачі двигунів пожежно-рятувального обладнання, що не може бути достовірно використане для оцінки теплового випромінювання факельного пристрою.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми залишається визначення параметрів теплового випромінювання при стаціонарному режимі роботи факельних пристроїв закритого типу установ з виробництва біогазу.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення параметрів тепловіддачі при нормальній експлуатації факельних пристроїв закритого типу комплексів з виробництва біогазу. Це дозволить визначити їх негативний тепловий вплив на сусідні об’єкти.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– розробити математичну модель на основі рівняння нестаціонарної теплопровідності для дослідження температурних режимів установки;

– провести дослідження питомих значень коефіцієнта тепловіддачі стінки кожуха факельної труби навколишньому середовищу.

4. Матеріали та методи досліджень

Об’єктом дослідження є процес тепловіддачі стінки кожуха факельної труби факельного пристрою закритого типу в навколишнє середовище.

Предметом дослідження були розрахункові значення критеріїв подібності теплових процесів та коефіцієнту тепловіддачі при роботі факельного пристрою.

Основною гіпотезою є суттєва залежність коефіцієнту тепловіддачі та температури від зовнішніх умов середовища та геометричних параметрів факельного пристрою [11–13]. Для опису процесу тепловіддачі використовується рівняння нестаціонарної теплопровідності з граничними умовами першого роду на внутрішній і третього роду на зовнішній поверхні стінки кожуха.

Розрахунки проводилися засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

5. Визначення коефіцієнту тепловіддачі при роботі факельних пристроїв закритого типу

5.1. Побудова розрахункової схеми стінки кожуха факельного пристрою та визначення граничних умов

Для проведення розрахунку параметрів теплопередачі факельного пристрою розглянуто розрахункову схему стінки труби факельного пристрою (рис. 2). Тоді рівняння теплопровідності для стінки кожуха факельного пристрою можна записати в наступному вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial\tau}\mathrm{T}(\mathrm{r},\tau)=\alpha\cdot\left(\frac{\partial^2}{\partial\mathrm{r}^2}\mathrm{T}(\mathrm{r},\tau)+\frac{\frac{\partial}{\partial\tau}\mathrm{T}(\mathrm{r},\tau)}{\mathrm{r}}\right), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності; $\mathrm{T}(\mathrm{r},\tau)$ – значення температури на відстані r від центру огородження в момент часу τ.

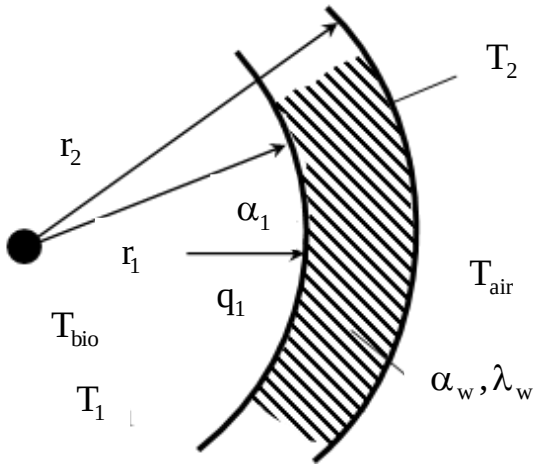


Рис. 2. Розрахункова схема стінки кожуха факельного пристрою: α_w, λ_w – коефіцієнт температуропровідності та теплопровідності матеріалу стінки огородження; T_{bio}, T_{air} – температура продуктів горіння біогазу (залежить від складу біогазу) та повітря; r_1, r_2 – зовнішній та внутрішній радіуси стінки огородження; T_1, T_2 – температура внутрішньої та зовнішньої стінки огородження; α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від продуктів горіння біогазу до внутрішньої стінки огородження; α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки до повітря; q_1 – тепловий потік від продуктів горіння біогазу до внутрішньої стінки огородження

Виходячи з розрахункової схеми кожуху факельного пристрою та рівняння теплопровідності, приймаються граничні умови першого роду на внутрішній і третього роду на зовнішній поверхні стінки кожуха.

$$T_1 = T_{bio}, \tag{2}$$

$$\lambda_w \frac{\partial}{\partial \tau} T(r, \tau)\Big|_{r=r_2} = \alpha_2 (T_2 - T_{air}), \tag{3}$$

Також слід враховувати, що T_{air} і q_2 взаємопов'язані, тобто:

$$T_{air} = f\left(\lambda_w \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r},\ S_{surf},\ m_{air},\ \alpha_2\right), \tag{4}$$

де S_{surf} – площа, через яку проходить тепловий потік q_2, m_{air} – маса повітря в радіусі r.

Під час побудови математичної моделі були зроблені наступні припущення:

– температура на внутрішній стінці кожуха однакова і дорівнює температурі продуктів згоряння біогазу (граничні умови першого роду);

– в розрахунковій схемі не врахована теплопровідність через виробничу арматуру факельного пристрою;

– в процесі нагрівання геометричні параметри стінки кожуха не змінюються.

5.2. Визначення коефіцієнту тепловіддачі стінки кожуха факельного пристрою

Коефіцієнт тепловіддачі при використанні факельного пристрою для спалювання біогазу можна визначити на основі наступного виразу:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}, \tag{5}$$

© С. І. Зімін, К. А. Афанасенко

де Nu – критерій подібності теплових процесів, що характеризує співвідношення між інтенсивністю теплообміну за рахунок конвекції та інтенсивністю теплообміну за рахунок теплопровідності; α – коефіцієнт тепловіддачі; λ – коефіцієнт теплопровідності; L – характерний розмір.

Середнє значення $\overline{Nu}$ для випадку вільної конвекції на вертикальній стінці визначали за формулою:

$$Nu = 0{,}68 + \frac{0{,}67 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4}}{\left[1 + (0{,}492/Pr)^{4/9}\right]},\ (Gr \cdot Pr) \le 10^9, \quad (6)$$

де Pr – критерій подібності теплових процесів у рідинах і газах, що враховує вплив фізичних властивостей теплоносія на теплообмін (для триатомних і багатоатомних газів 0,75≤Pr≤1); Gr – критерій подібності теплообміну при вільному русі в полі тяжіння.

Значення Gr визначали за таким виразом:

$$Gr = \frac{g\beta(T_2 - T_{air})L^3}{\nu^2}, \quad (7)$$

де g – прискорення вільного падіння, g=9,81 м/с²; L – погонний розмір поверхні теплообміну, м; T_2 – температура поверхні теплообміну, К; T_{air} – температура повітря, К; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; β– температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Для повітря β=3,428·e^(-0,002·T_2), 1/К.

Коефіцієнт кінематичної в'язкості визначають за формулою:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (8)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Показано, що коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря залежить від температури та інваріантний до величини тиску біогазу. В результаті обробки експериментальних даних отримано залежність кінематичної в'язкості від температури.

На рис. 3 наведено розрахункові значення критерію подібності в залежності від різних умов та лінійних розмірів огороджувальної труби факельного пристрою та температури на її зовнішній поверхні.

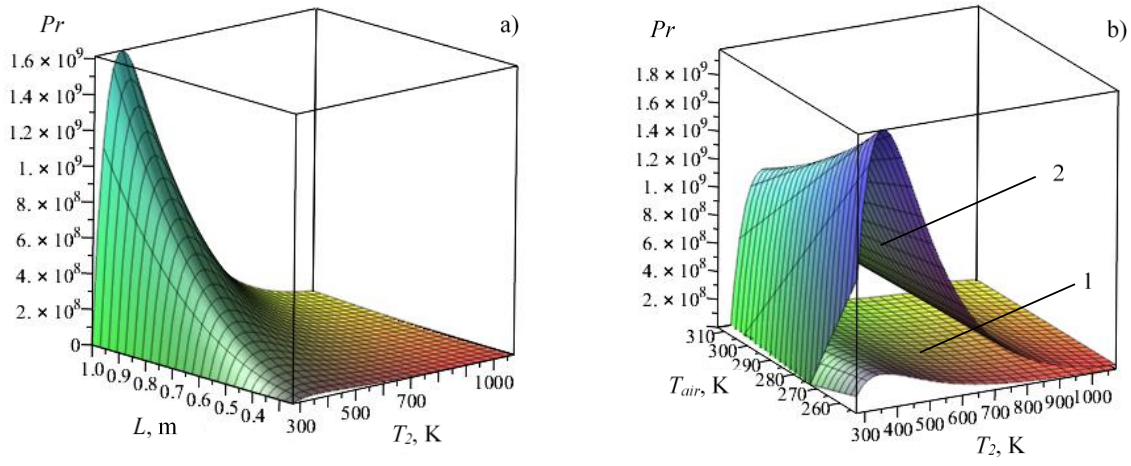


Рис. 3. Значення критерію подібності теплообміну: а – в залежності від характерного геометричного розміру і температури поверхні; б – від температури повітря і температури поверхні: 1 – L=0,5 м; 2 – L=1 м

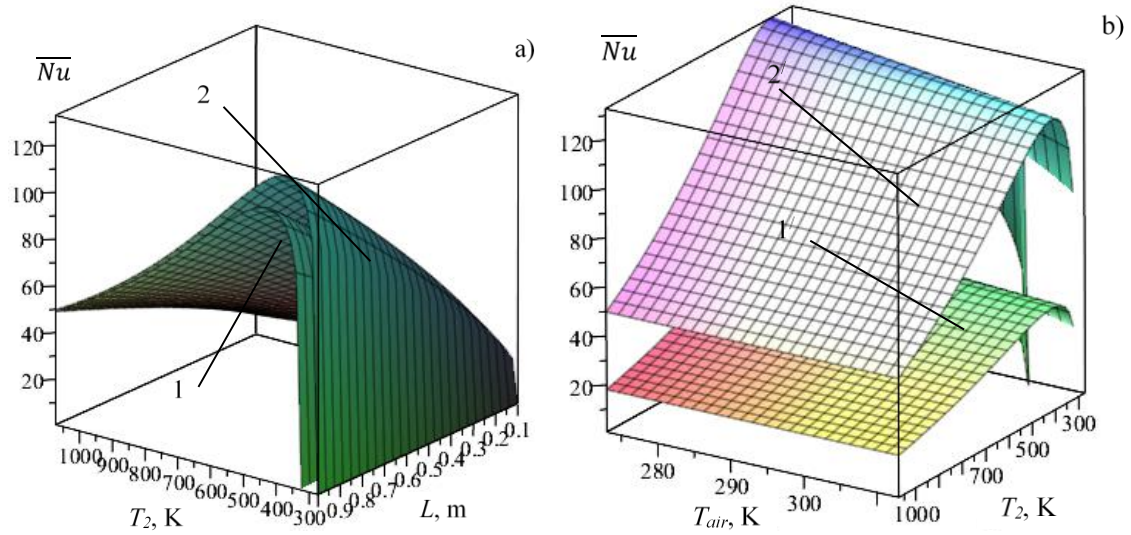


Рис. 4. Значення середнього критерію подібності теплових процесів $\overline{Nu}$: а – за характерним геометричним розміром і температурою поверхні: 1 – T_{air}=273 К; 2 – T_{air}=313 К; б – за температурою повітря і температурою поверхні: $1^{/}$ – L=0,5 м; $2^{/}$ – L=1 м

На рис. 4 і рис.5 наведено залежності середнього критерію подібності теплових процесів і коефіцієнта тепловіддачі відповідно в залежності від різних критеріїв.

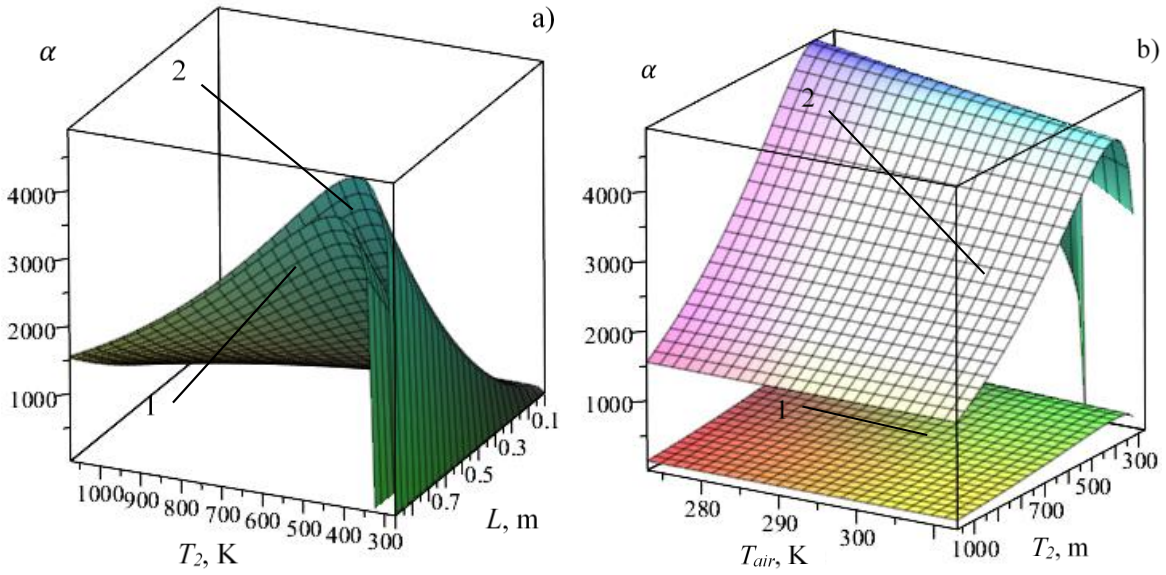


Рис. 5. Значення коефіцієнта тепловіддачі α: а – від характерного геометричного розміру і температури поверхні: 1 – T_{air}=273 К; 2 – T_{air}=313 К; б – від температури повітря і температури поверхні: $1^{/}$ – L=0,5 м; $2^{/}$ – L=1 м

Аналіз рис. 4 та рис.5 показує, що значення коефіцієнтів тепловіддачі при роботі факельних труб є нелінійним і потребує подальшого дослідження.

6. Обговорення результатів із визначення коефіцієнту тепловіддачі факельного пристрою

Отримано математичну модель на основі рівняння нестаціонарної теплопровідності, яка дозволить теоретично досліджувати температурні режими факельної установки і її негативний температурний вплив на сусідні об’єкти.

Граничні умови першого роду на внутрішній поверхні стінки кожуха обумов-

© С. І. Зімін, К. А. Афанасенко

лені близькістю полум'я до стінки, а третього роду на зовнішній поверхні – процесами теплообміну в реальних умовах. Обмеженням моделі є припущення про незмінний розподіл температури спалюваного біогазу всередині факельного пристрою незалежно від геометричного розташування точки.

Отримано розрахункові значення критерію подібності в залежності від різних умов та лінійних розмірів огороджувальної труби факельного пристрою та температури на її зовнішній поверхні.

Встановлено, що величина температури повітря практично лінійно впливає на зміну величини коефіцієнта значення $\overline{\mathrm{Nu}}$ та Pr (рис. 3, 4). При цьому, аналіз даних показує, що в залежності від температури зовнішнього середовища їх значення можуть змінюватися в межах 10–24 %, а при зміні геометричних параметрів факельного пристрою – до 65 %.

Отримані залежності коефіцієнта тепловіддачі α (рис. 5) від характерного геометричного розміру, а також від температури повітря і температури поверхні кожуха показують, що його величина може змінюватися до 1000 % в залежності від лінійного розміру та температури поверхні кожуха. Встановлено, що величина коефіцієнта тепловіддачі α практично інваріантна до значення температури повітря (рис. 5). Таким чином, отримані на рис. 3 – рис. 5 дані дозволяють лише якісно оцінити величину коефіцієнта тепловіддачі. Тому у подальшому доцільно використати отримані в роботі дані для отримання розрахункових значень температур при роботі факельних пристроїв при різних режимах роботи і їх порівняння із експериментально отриманими величинами, що потребує додаткових досліджень.

7. Висновки

1. Розроблено математичну модель для дослідження температурного режиму факельної установки закритого типу на основі рівняння нестаціонарної теплопровідності. Прийнято, що для внутрішньої поверхні огороджувального кожуха застосовуються граничні умови першого роду, а на зовнішній – третього роду. Для побудови моделі прийняті припущення щодо температурних параметрів горючого середовища та геометричних розмірів факельного пристрою.

2. При розрахунку у відповідності до отриманої моделі критерію подібності теплових процесів встановлено, що в залежності від температури зовнішнього середовища його значення можуть змінюватися в межах 10–24 %. При цьому геометричні параметри факельного пристрою мають суттєвіший вплив на критерій – до 65 %. Далі отримані аналітичні залежності коефіцієнта тепловіддачі α від характерного геометричного розміру, а також від температури повітря і температури поверхні кожуха. Показано, що його величина може змінюватися до 1000 % в залежності від лінійного розміру та температури поверхні кожуха.

Література

1. Smith J. D., Jackson R., Suo-Antilla A. Estimated flare emissions created during flare ignition transient. International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI). 2017. P. 1–2. doi: 10.1109/EIOGI.2017.8267637

2. Taghavifar M., Zandi M. A review of new flare gases recovery methods to increase energy efficiency and reduce pollutants. 9-th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG). 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/ICREDG54199.2022.9804550

3. Зімін С. І., Афанасенко К. А., Липовий В. О. Температурний режим факельної установки закритого типу. Проблеми надзвичайних ситуацій: Збірка наукових праць. 2022. Вип. 2(36). С. 267–279. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-20

4. Afanasenko K., Lypovyi V. Zimin S. Manufacturing entities flare systems fire hazard analysis. Inzynieria Bezpieczenstwa Obiektów Antropogenicznych. 2021. № 1. P. 9–14. doi: 10.37105/iboa.102

5. ВБН В.1.1-00013741-001:2008. Факельні системи. Промислова безпека. Основні вимоги. Чинний від 2008-07-03. Вид. офіц. Київ: Мінпаливенерго України, 2008. 44 с. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78441

6. Михайлюк О. П., Афанасенко К. А., Савченко О. В., Зімін С. І., Статівка Є. С. Дослідження щодо безпечного розташування факельних систем біогазової установки. Проблемы пожарной безопасности: Сборник научных трудов. 2020. Вип. 47. С. 81–85. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb47/12.pdf

7. Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting. Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design. Kolmetz Karl et al. KLM Technology Group, 2020. 128 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/338831959_PROCESS_FLARE_SYSTEMS_SAFETY_SELECTION_SIZING_AND_TROUBLESHOOTING_Kolmetz_Handbook_Of_Process_Equipment_Design

8. Serth R., Lestina Th. Process Heat Transfer. Principles, Applications and Rules of Thumb. 2nd Edition. Academic Press, 2014. 770 p. doi: 10.1016/C2011-0-07242-3

9. Roetzel W., Luo X., Chen D. Design and Operation of Heat Exchangers and their Networks. Academic Press, 2020. 577 p. doi: 10.1016/C2017-0-03210-X

10. Nitsche M., Gbadamosi R. O. Heat Exchanger Design Guide. A Practical Guide for Planning, Selecting and Designing of Shell and Tube Exchangers. Academic Press, 2016. 270 p. doi: 10.1016/C2014-0-04971-4

11. Нікіпчук С. В. Визначення коефіцієнта теплопередачі в двигуні приводу пожежно-рятувального обладнання аналітичними засобами. Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Львів: 20–21 жовтня 2016. ЛДУБЖД. 2016. С. 433–435. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/9064/1/Kondor_Hashchuk_Nikipchuk.pdf

12. Чепурний М. М., Резидент Н. В. Тепломасообмін в прикладах і задачах: навчальний посібник. Вінниця, 2011. 128 с. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8043/%D0%A7%D0%B5%D0%BF%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%BE%D0%B1%D0%BC%D1%96%D0%BD.pdf?sequence=4&isAllowed=y

13. Гільчук А. В., Халатов А. А., Доник Т. В. Теорія теплопровідності: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 153 с. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f2c859d5-be0b-486f-80c1-7e3fc320b662/content

S. Zimin, *Researcher of the Department*
K. Afanasenko, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF THE TORCH INSTALLATION UNDER THE CONDITIONS OF FREE CONVECTION

A model is proposed for the study of temperature regimes of flare devices of biogas complexes based on the equation of non-stationary thermal conductivity. Despite the generally extremely complex phenomenon of heat exchange, heat transfer, and heat transfer, during the operation of the flare device

© С. І. Зімін, К. А. Афанасенко

such conditions exist that allow relying on relatively simple model descriptions, which can allow an assessment of the degree of danger of thermal radiation during its operation. The calculation scheme of the shielding pipe of the flare device with the calculation parameters was built and considered. Boundary conditions of the first kind on the inner and of the third kind on the outer surface of the casing wall of the flare device pipe are adopted. To build the model, the following assumptions were made: the temperature on the inner wall of the casing is the same and equal to the temperature of the biogas combustion products; the calculation scheme does not take into account thermal conductivity through the production armature of the flare device; in the process of heating, the geometric parameters of the casing wall do not change. It was determined that the heat transfer coefficient when using a flare device for burning biogas can be determined from the expression for determining the criterion of similarity of thermal processes. When calculating the criterion of similarity of thermal processes according to the obtained model, it was found that depending on the temperature of the external environment, its values can vary by 10–24 %. At the same time, the geometric parameters of the flare device have a more significant influence on the specified criteria – up to 65 %. The obtained analytical dependences of the heat transfer coefficient α on the characteristic geometric size, as well as on the air temperature and the temperature of the casing surface, which allows determining the negative thermal impact on the surrounding environment. It is shown that its value can vary up to 1000 % depending on the linear size and temperature of the casing surface.

Keywords: torch systems, torch pipes, temperature, thermal radiation, heat transfer coefficient

References

1. Smith, J. D., Jackson, R., Suo-Antilla, A. (2017). Estimated flare emissions created during flare ignition transient. International Conference on Environmental Impacts of the Oil and Gas Industries: Kurdistan Region of Iraq as a Case Study (EIOGI), 1–2. doi: 10.1109/EIOGI.2017.8267637

2. Taghavifar, M., Zandi, M. (2022). A review of new flare gases recovery methods to increase energy efficiency and reduce pollutants. 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG), 1–6. February 23–24, 2022, Mashhad, Iran. doi: 10.1109/ICREDG54199.2022.9804550

3. Zimin, S., Afanasenko, K., Lypovyi, V. (2022). The temperature regime of a closed-type flare system. Problems of Emergency Situations: Scientific Journal, 2(36), 267–279. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-20

4. Afanasenko, K., Lypovyi, V., Zimin, S. (2021). Manufacturing entities flare systems fire hazard analysis. Inzynieria Bezpieczenstwa Obiektów Antropogenicznych, (1), 9–14. doi: 10.37105/iboa.102

5. Flare systems. Industrial safety. Basic requirements: VBN V.1.1-00013741-001:2008. (2008). Kyiv: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine. Available at: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=78441

6. Mykhailiuk, O. P., Afanasenko, K. A., Savchenko, O. V., Zimin, S. I., Stativka, E.S. (2020). Research on the safe location of flare systems of a biogas plant. Problems of fire safety: Collection of scientific works, (47), 81–85. Available at: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb47/12.pdf

7. Kolmetz, K., Ling, Y., Riska. (2020). Process flare systems safety, selection, sizing, and troubleshooting. Kolmetz Handbook Of Process Equipment Design. KLM Technology Group. Available at: https://www.researchgate.net/publication/338831959_PROCESS_FLARE_SYSTEMS_SAFETY_SELECTION_SIZING_AND_TROUBLESHOOTING_Kolmetz_Handbook_Of_Process_Equipment_Design

8. Serth, R., Lestina, T. (2014). Process Heat Transfer. Principles, Applications and Rules of Thumb. 2nd Edition. Academic Press. doi: 10.1016/C2011-0-07242-3

9. Roetzel, W., Luo, X., Chen, D. (2020). Design and Operation of Heat Exchangers and their Networks. Academic Press. doi: 10.1016/C2017-0-03210-X

10. Nitsche, M., Gbadamosi, R. O. (2016). Heat Exchanger Design Guide. A Practical Guide for Planning, Selecting and Designing of Shell and Tube Exchangers. Academic Press. doi: 10.1016/C2014-0-04971-4

9. Nikipchuk, S. V. (2016). Determination of the heat transfer coefficient in the drive engine of fire-rescue equipment by analytical means, Fire and man-made safety. Theory, practice, innovations: Materials of the International Scientific and Practical Conference, 433–435. October, 20–21. LSU LS, Lviv. Available at: https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/9064/1/Kondor_Hashchuk_Nikipchuk.pdf

10. Chepurnyi, M. M., Resident, N. V. (2011). Heat and mass transfer in examples and problems: study guide. Vinnitsa. Available at: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8043/%D0%A7%D0%B5%D0%BF%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%A2%D0%B5%D0%BF%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%BE%D0%B1%D0%BC%D1%96%D0%BD.pdf?sequence=4&isAllowed=y

11. Hilchuk, A. V., Khalatov, A. A., Donyk, T. V. (2020). Theory of heat conduction: a study guide. Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky. Available at: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f2c859d5-be0b-486f-80c1-7e3fc320b662/content

Надійшла до редколегії: 06.03.2024
Прийнята до друку: 17.04.2024

© С. І. Зімін, К. А. Афанасенко

UDK 614.8

Y. Kalchenko, *PhD, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0002-3482-0782)*
K. Afanasenko, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department (ORCID 0000-0003-1877-1551)*
S. Vavreniuk, *Dcs, Professor of the Department (ORCID 0000-0002-6396-9906)*
D. Pisklova, *Cadet (ORCID 0009-0004-9521-7006)*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ASSESSMENT OF EXCESS PRESSURE DURING ACCIDENTS AT OIL REFINERIES

Assessed the excess explosion pressure during an accident on oil tanks. In the studies, three cases of accidents were considered: local depressurization of the oil tank, full depressurization of the oil tank without the formation of a breakthrough wave and full depressurization with the formation of a breakthrough wave of the oil. The study was conducted for tanks with a volume of 10.000 m³. The paper considers a mathematical model of the overpressure of the explosion of vapors evaporated from a oil spill in the event of these accidents. According to this mathematical model, graphs of the dependence of excess explosion pressure on the radius were built. From the analysis of these graphs, numerical values of the radii of buildings damage degreewere determined. In case of full depressurization of the oil tank with the formation of a breakthrough wave, the radii of buildings damage degreewill be significantly larger than in the case of full depressurization without the formation of a breakthrough wave, which is due to a significant increase in the area of evaporation of the oil. It is determined that the presence of a serviceable dike can significantly reduce the consequences of accidents that can occur when damaged oil tanks. The radii on which a person will suffer damage of various degrees of complexity from the explosion of oil product vapors during their spill as a result of an accident on oil tanks are determined. It was established that for the case of local and full depressurization of a tank with an oil product without the formation of a breakthrough wave, a person will not receive too severe affections from a shock wave. In this case, for the case of full depressurization of the oil tank with the formation of a breakthrough wave, this distance will be at least 535 meters. The obtained results allow to assess the consequences of accidents on oil tanks and can be used to determine the distances of personnel and their special protective clothing.

Keywords: excess explosion pressure, oil spill, oil tanks, consequences of accidents

1. Introduction

Fire hazard of petrochemical industry facilities must meet the requirements of fire, energy, economic, environmental safety. The issues of fire and explosion safety of oil refining industry enterprises are very relevant. This is explained by: the presence of potential dangers that cause material and human losses; concentration of chemical energy carriers, oil and oil products, their ability to burn, explode and pollute the atmosphere with hazardous emissions, extremely high energy saturation of oil refining industry facilities.

Modern enterprises of the oil refining industry are a constant source of threats that have a global social character and require adequate measures for the safety of the population and the environment. A significant number of hazards occur in the petrochemical and oil refining industries. Tank farms are the main place of storage of crude oil and petroleum products at oil refineries, transshipment and distribution depots, enterprises of automobile, railway, water, air transport. Accumulation of flammable and combustible liquids in a relatively small area of the tank farm leads to increased fire hazard of such facilities. The spill and ignition of petroleum products is one of the most dangerous emergencies that can lead not only to significant material losses, but also to human casualties. In terms of complexity, the fire in the tank farm is one of the largest, you have to think about the location of communications passing nearby and the location of adjacent rooms.

The situation is complicated by the war on the territory of Ukraine, since most objects of the petrochemical industry are constantly shelled by the aggressor country. Before the war, the number of fires over the past 30 years remained virtually unchanged: during the year on the territory of Ukraine there are on average 2 fires for 3 years at large oil refineries or oil depots. Over the last two years, the number of accidents at side facilities has sharply increased. At what oil tanks can be damaged directly by shells, their fragments, and so the shock wave caused by the hit of missiles near the tank. Based on this, the assessment of the consequences of emergencies that may occur at petrochemical facilities is relevant.

2. Analysis of literature data and problem statement

The fire hazard of petrochemical industry facilities must meet the requirements of fire, energy, economic and environmental safety. The issues of ensuring fire and explosion safety of enterprises of the oil refining industry are very relevant. This is explained by: the presence of potential dangers causing material and human losses; the concentration of chemical energy carriers, oil and oil products, their ability to burn, explode and pollute the atmosphere [1], underground and river waters due to seepage of liquid deep into the soil [2] with dangerous emissions, extremely high saturation energy of oil refining industry capacities. Spreading over considerable distances, they significantly affect the state of the air [3]. The shortcoming of the works [1–3] is that they consider the consequences of accidents at the facilities of the petrochemical industry from the point of view of impact on the environment, while the consequences of direct impact on people and buildings remain undefined.

About 60 % of fire emergencies are fires involving flammable liquids [4]. Accidents of vertical steel tanks, as a rule, are accompanied by oil spills and fires caused by it, which leads to man-made disasters, violations of normal operation and significant environmental pollution [5]. In works [4–5] models of spill area of various oil products depending on various factors are considered, while the conditions for the formation of a fire-hazardous environment during the formation of such spills are not defined.

In [6], the main causes of accidents at tanks with oil products are considered, the most common of which are violations of the technological conditions of operation, defects and violations during installation, damage by debris and shock waves during shelling of oil tanks, corrosion, etc.

The paper [7] investigated the thermal effect of a fire in a tank with petroleum products on the neighboring tank. Using the thermal conductivity equation, the temperature distribution inside the tank wall is determined. However, this research paper does not consider the consequences of an oil spill. In [8], a model of the thermal effect of a flame on a container with oil products located nearby is proposed, but this model does not take into account the different temperatures on the outer and inner surfaces of the container. In the paper [9], the authors analyze the impact of a fire in a nearby tank and a collapse fire on a tank with petroleum products.

In [10], a model of the burning of an oil spill on a horizontal surface in the shape of a circle is presented. The disadvantage of the model is that the slope of the surface is not taken into account, which leads to the stretching of the spill area along the direction of the slope [11]. In [12], the method of experimentally determining the parameters of infiltration into the soil is given, but the parameters of the flame above the burning and spreading liquid are not taken into account. In [13], a model of the convection component of the heat flow from a spill fire of arbitrary shape is described. This model takes

© Y. Kalchenko, K. Afanasenko, S. Vavreniuk, D. Pisklova

place during the formation of a spill of petroleum products and their ignition without the formation of an explosion. The article does not consider the case when, due to the spread of oil products, an explosive vapor-air concentration is formed over them, which, in the presence of an ignition source, is capable of exploding and the consequences to which this can lead.

Thus, the unsolved part of the considered problem is the lack of research on the consequences of accidents caused by the explosion of a vapor-air mixture formed as a result of the evaporation of an oil spill and their impact on people and buildings.

3. The purpose and tasks of the research

The purpose of the work is to evaluate the impact of the overpressure of the explosion on people and buildings during various accidents on oil tanks.

To achieve the goal, the following tasks must be solved:

– to determine the dependence of the excess pressure of the explosion on the distance in various accidents on tanks with oil products;

– to determine the degree of damage to people and buildings under the action of excess pressure of the explosion, which was formed as a result of accidents.

4. Research materials and methods

The object of the study is the consequences of accidents during the destruction of tanks with petroleum products.

The subject of the study is the assessment of the degree of damage to people and buildings by the shock wave of the explosion of a vapor-air cloud over an oil spill. The hypothesis of the study is that the formation of a shock wave of an explosion of a steam-air cloud over an oil spill can lead to the death or injury of people and the destruction of buildings and structures.

Tabl. 1. Initial data

Parameter	Value
Oil tank volume, m^3	10000
Height, m	12.0
Radius, m	17.1
Oil density, kg/m^3	850
Coefficient of spillage during spreading, f_p/m	20
Oil temperature, $^\circ C$	39
Lower flame propagation concentration limit, %	0.9
Molecular weight, $kg/kmol$	50
Acceleration of gravity, m/s^2	9.8
Air pressure, kPa	101.325
Degree of filling of oil tank, %	90
Block time, s	3600
Saturated oil vapor pressure, kPa	60
Saturated oil vapor concentration, %	59.215
Diameter of hole formed during depressurization, m	0.05

In the study were estimated the consequences of emergency situations at oil depots. For research were chosen three possible scenarios of fire occurrence and development:

– local depressurization with the occurrence of an oil spill fire in the diking;

– full oil tank depressurization without wave with the occurrence of an oil spill fire throughout all the dike area;

– full oil tank depressurization with wave which burns and goes through the dike area.

The data were used for the studies presented in Tabl. 1. For research were used 10.000 cubic meter oil tanks were, as are the most common in Ukraine. Calculations will be carried out by computing equipment using the Maple program.

5. Mathematical model oil spill fire thermal influence size zones estimation

Value of excess pressure determined by the formula:

$$\Delta p = p_x \cdot p_0, \tag{1}$$

where the value of dimensionless excess pressure is:

$$p_x = \begin{cases} \left(\frac{u^2}{C_0^2}\right)\cdot\left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)\cdot\left(\frac{0{,}83}{r_x}-\frac{0{,}14}{r_x^2}\right), \text{if } r_x > 0{,}34 \\ \left(\frac{u^2}{C_0^2}\right)\cdot\left(\frac{\sigma-1}{\sigma}\right)\cdot\left(\frac{0{,}83}{0{,}34}-\frac{0{,}14}{0{,}34^2}\right), \text{if } r_x \le 0{,}34 \end{cases}, \tag{2}$$

the value of dimensionless distance from center of the cloud:

$$r_x = \frac{r}{(E/p_0)^{1/3}} \tag{3}$$

and E – effective energy reserve of combustible mixture.

Visible flame speed determined by the formula:

$$u = \begin{cases} u_p, \text{if } u_p > 300; \\ 300, \text{if } u_p \le 300. \end{cases} \tag{4}$$

where estimated flame speed is:

$$u_p = k_1 m_п^{1/6}, \tag{5}$$

the mass of evaporated oil product vapors:

$$m_п = 0{,}15\rho V_s, \tag{6}$$

where V_s – volume of spill oil, ρ – oil density.

For a scenario with full depressurization of the tank without creating a break-through wave, the volume of oil flowing out is determined by the formula:

$$V_s = h_d \frac{\pi D_p^2}{4}. \tag{7}$$

For a scenario with complete depressurization of the tank with the formation of a breakthrough wave, the volume of oil spilled will be determined by the formula:

© Y. Kalchenko, K. Afanasenko, S. Vavreniuk, D. Pisklova

$$V_s = \varepsilon H_t \frac{\pi D_p^2}{4}. \quad (8)$$

Tabl. 2. Oil spill area for different emergency scenarios

Emergency scenarios	Oil spill area, m²
Local depressurization	1267
Full oil tank depressurization without wave	17564
Full oil tank depressurization with wave	297637

The area of the oil spill for various emergency scenarios, which was calculated based on the data in Tabl. 1, is presented in Tabl. 2.

6. Assessment of damage degree to people and buildings from explosion

Using formula (1), the graphs of the excess explosion pressure during combustion of the explosive hazardous steam-air mixture against the distance for various accidents of oil tanks were plotted and shown in Fig. 1.

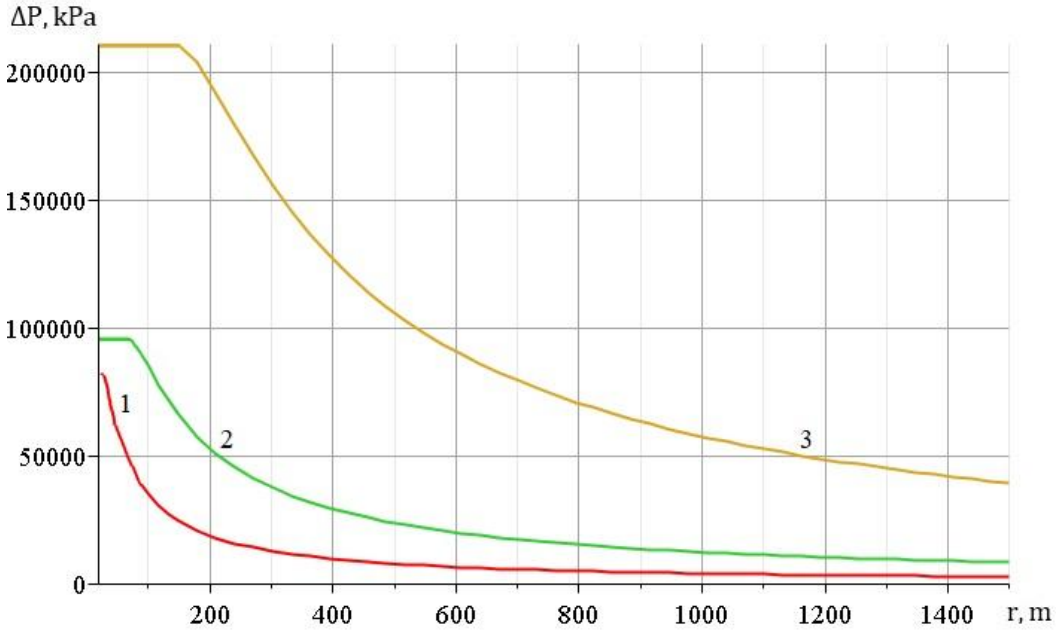


Fig. 1. Dependence of excess pressure on the distance for oil tank when it has: 1 – local depressurization; 2 – full depressurization, without wave; 3 – full depressurization, with wave

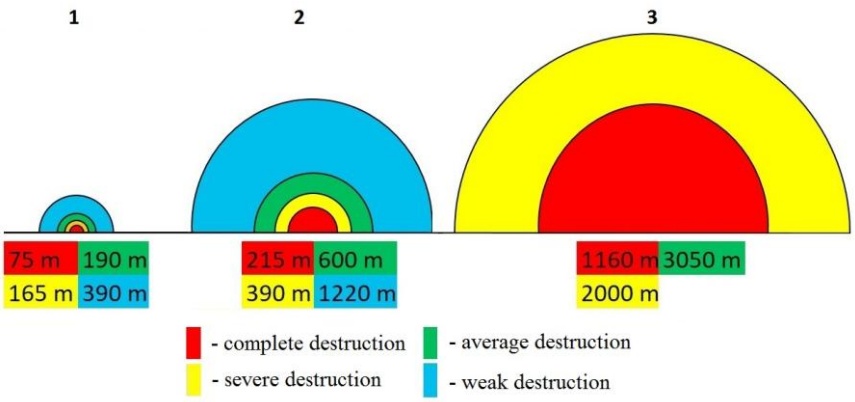


Fig. 2. Radii of Buildings Damage Degree in an Oil Spill Explosion: 1 – local depressurization; 2 – full depressurization, without wave; 3 – full depressurization, with wave

From the analysis of the graphs presented in Fig. 1, the distances at which a person will receive different degrees of shock wave damage resulting from local depressurization of the oil tank, full oil tank depressurization without wave and full oil tank depressurization without for oil tanks with a volume of 10.000 m³ are determined are presented respectively in Tabl. 3.

Tabl. 3. Humans Damage Degrees (Oil tank V=10000 m³)

Damage Degrees	Radius, m
Local depressurization	
Light affections	84–180
Average affections	50–84
Severe affections	<50
Too severe affections	–
Full depressurization, without wave	
Light affections	280–600
Average affections	170–280
Severe affections	<170
Too severe affections	–
Full depressurization, with wave	
Light affections	1470–3000
Average affections	950–1470
Severe affections	535–950
Too severe affections	>535

Also, the radii of destruction of buildings during the explosion of the steam-air mixture formed as a result of local depressurization of the tank, complete depressurization of the tank without the formation of a breakthrough wave and complete depressurization of the tank with the formation of a breakthrough wave were determined, which are presented in Fig. 2.

7. Discussion of the results of the overpressure assessment of the explosion

The assessment of the consequences of an accident at petrochemical enterprises, namely an explosion of a vapor-air mixture on a spill of a petroleum product, which was formed when a reservoir with a petroleum product was damaged, was studied. When conducting the research, it was assumed that the oil product was spilled on a flat asphalted surface, and the spilled substance was oil.

Tabl. 2 shows oil spill zones with various damage to oil tanks. From the analysis of this table, it can be stated that the presence of a technically sound dike can significantly reduce the area of oil spill. At the same time, under the condition of complete depressurization of the tank with the formation of a breakthrough wave, the area of oil spill will increase by no less than 16.84 times compared to the complete depressurization of the tank without the formation of a breakthrough wave. This is due to the fact that when the reservoir is fully depressurized without a breakthrough wave, the spill zone will be limited to the dam area.

From the analysis of the graphs presented in fig. 1, the radii of destruction of buildings during the explosion of a vapor-air mixture are determined, as shown in Fig. 2. From this figure, it can be seen that with local depressurization of the oil tank, the radius of complete destruction of buildings will be 75 meters, with complete de-

© Y. Kalchenko, K. Afanasenko, S. Vavreniuk, D. Pisklova

struction of the tank without the formation of a breakthrough wave, 215 meters, and with complete destruction with the formation of a breakthrough wave – 1160 meters. Based on this, it can be argued that the presence of collapse can reduce the radius of the lesion by at least 5.39 times.

It follows from table 3 that with local depressurization and full depressurization without the formation of a wave, a person will not receive too severe injuries. And with complete depressurization by wave formation, this distance will be 535 meters. At the same time, a person will receive severe damage in the case of local depressurization of the tank at a distance of up to 50 meters, in the case of full depressurization without the formation of a breakthrough wave, this distance will be 3.4 times greater, and in the case of full depressurization due to the formation of a wave, this distance will be 10.7 times. This is due to the fact that the area of oil spillage when the tank is completely depressurized with the formation of a breakthrough wave is much larger, and accordingly, the area of evaporation is also larger.

The disadvantages of this study are the narrow area of obtaining results. This is due to the fact that when applying this method, the physical characteristics of the spreading substance are taken into account, so separate calculations must be made for each substance. Evenness of the surface and its material can also play a significant role in obtaining results. Future research will be directed to the construction of mathematical models of oil product spreading that take into account the topography of the area. Such studies require the use of mathematical apparatus, which involves the solution of integral equations and the use of mathematical software.

Based on these data, it can be argued that the presence of a functional collapse can significantly reduce the consequences of accidents at oil storage facilities. In general, the data given in the work can be used by fire extinguishing managers for the placement of personnel and equipment during the liquidation of accidents at such facilities. For example, the data in Tabl. 3 can be used to determine the distances of personnel and special equipment.

8. Conclusions

1. The dependence of the excess explosion pressure on the distance in various accidents on oil tanks was determined and graphs of these dependencies were plotted. Numerical values of radii of destruction of buildings and structures of different degrees are determined. It was determined that with local depressurization of the oil tank, the radius of damage will be 75 meters, with full depressurization it will increase by 2.86 times, and with full depressurization with the formation of a wave by 15.46 times. Based on this, it can be argued that the presence of a serviceable dike can significantly reduce the consequences of accidents on oil tanks.

2. The degrees of damage to people by the shock wave, which was formed as a result of the explosion of a mixture of vapors of a petroleum product spill during accidents on tanks with oil of various nature, which are presented in the form of a table, are determined. It is established that in the case of local depressurization and full depressurization without wave, people will not receive too severe affections, and in the case of full depressurization with wave, this distance at which people will receive too severe affections will be 535 meters.

References

1. Kustov, M. V., Kalugin, V. D., Tutunik, V. V., Tarakhno, E. V. (2019). Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii, 1, 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

2. Loboichenko, V., Strelec, V. (2018). The natural waters and aqueous solutions express-identification as element of determination of possible emergency situation. Water and Energy International, 61, 9, 43–50. Available at: https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=61r&issue=9&article=008

3. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Kameneva, I., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T. (2020). Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. Journal of Health and Pollution, 10, 25. doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

4. Fabiano, B., Caviglione, C., Reverberi, A. P., Palazzi, E. (2016) Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. Chemical Engineering Transactions, 48, 187–192. doi: 10.3303/CET1648032

5. Raja, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T. (2018). Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting. Journal of Failure Analysis and Prevention, 18, 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1

6. Vasilchenko, A., Otrosh, Yu., 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

7. Semerak, M., Pozdeev, S., Yakovchuk, R., Nekora, O., Sviatkevich, O. (2018). Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences, 247(00040). doi: 10.1 051/matecconf/201824700040

8. Espinosa, S. N., Jaca, R. C., Godoy, L. A. (2019). Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 62(103990). doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990

9. Ahmadi, O., Mortazavi, S. B., Pasdarshahri, H., Mohabadi, H. A. (2019). Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection, 123, 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006

10. Abramov, Y., Basmanov, O., Krivtsova, V., Salamov, J. (2019). Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface, Naukovyi Visnyk NHU 4, 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16

11. Oliinik, V., Basmanov, O. (2023). Model of spreading and burning the liquid on the soil, Problems of emergency situations, 1(37), 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

12. 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

13. Abramov, Y., Basmanov, O., Oliinik, V., Khmyrov, I., Khmyrova, A. (2022). Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire at railway accidence. EUREKA: Physics and Engineering, 6, 128–138. doi: 10.21303/2461-4262.2022.002702

 © Y. Kalchenko, K. Afanasenko, S. Vavreniuk, D. Pisklova

Я. Ю. Кальченко, *PhD, доц. каф.*
С. А. Вавренюк, *д.держ.упр., проф. каф.*
К. А. Афанасенко, *к.т.н, доцент, заст. нач. каф.*
Д. О. Пісклова, *курсантка*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОЦІНКА НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ ВИБУХУ ПРИ АВАРІЯХ НА НАФТОПЕРЕРОБНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Проведено оцінку надлишкового тиску вибуху при аварії на резервуарах з нафтопродуктом. У дослідженнях було розглянуто три випадки аварій: локальна розгерметизація резервуару з нафтопродуктом, повна розгерметизація резервуару без утворення хвилі прориву та повна розгерметизація з утворенням хвилі прориву нафтопродукту. Дослідження було проведено для резервуарів об'ємом 10000 м³. В роботі розглянута математична модель надлишкового тиску вибуху парів, що випаровуються з розливу нафтопродукту у випадку цих аварій. За цією математичною моделлю були побудовані графіки залежності надлишкового тиску вибуху від радіусу. Із аналізу цих графіків визначені численні значення радіусів ступенів руйнувань будівель і споруд. Встановлено, що у випадку повної розгерметизації резервуару з нафтопродуктом з утворенням хвилі прориву радіуси повних руйнувань будівель і споруд будуть значно більшими ніж у випадку повної розгерметизації без утворення хвилі прориву, що обумовлюється значним збільшенням площі випаровування нафтопродукту. Визначено, що наявність справного обвалування дозволяє у рази зменшити наслідки аварій, що можуть статися при пошкоджені резервуарів з нафтопродуктом. Визначені радіуси на яких людина отримає пошкодження різних ступенів складності від вибуху парів нафтопродукту при їх розливі внаслідок аварії на резервуарах з нафтопродуктами. Встановлено, що для випадку локальної та повної розгерметизації резервуару з нафтопродуктом без утворення хвилі прориву людина не отримає надважких ушкоджень від ударної хвилі. При цьому для випадку повної розгерметизації резервуару з нафтопродуктом з утворенням хвилі прориву ця відстань складе не менше 535 метрів. Отримані результати дозволяють оцінити наслідки аварій на резервуарах з нафтопродуктом та можуть бути використані керівниками гасіння пожеж для розміщення особового складу та техніки при виникненні аварій на цих об'єктах.

Ключові слова: надлишковий тиск вибуху, розлив нафтопродукту, резервуари з нафтопродуктом, наслідки аварій

Література

1. Kustov M. V., Kalugin V. D., Tutunik V. V., Tarakhno E. V. Physicochemical principles of the technology of modified pyrotechnic compositions to reduce the chemical pollution of the atmosphere. Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2019. № 1. P. 92–99. doi: 10.32434/0321-4095-2019-122-1-92-99

2. Loboichenko V., Strelec V. The natural waters and aqueous solutions express-identification as element of determination of possible emergency situation. Water and Energy International. 2018. № 61. 9. P. 43–50. URL: https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:wei&volume=61r&issue=9&article=008

3. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk assessment for the population of Kyiv, Ukraine as a result of atmospheric air pollution. Journal of Health and Pollution. 2020. Vol. 10. №. 25. P. 1–11. doi: 10.5696/2156-9614-10.25.200303

4. Fabiano B., Caviglione C., Reverberi A. P., Palazzi E. Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 48. P. 187–192. doi: org/10.3303/CET1648032

5. Raja S., Tauseef S. M., Abbasi T.: Risk of Fuel Spills and the Transient Models of Spill Area Forecasting. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. № 2. P. 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1

6. Vasilchenko A., Otrosh Yu., Adamenko N., Doronin E., Kovalov A.: Feature of fire resistance calculation of steel structures with in tumes centcoating. MATEC Web of Conferences. 2018. № 230. 02036. P. 1–5. doi: 10.1051/matecconf/201823002036

7. Semerak M., Pozdeev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sviatkevich O. Mathematical modeling of thermal fire effecton tanks with oil products. MATEC Web of Conferences. 2018. № 247(00040). P. 1–8. doi: 10.1051/matecconf/201824700040

8. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. Thermal effects of fire on a nearby fuels to rage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. № 62(103990). P. 1–13. doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990

9. Ahmadi O., Mortazavi S. B., Pasdarshahri H., Mohabadi H. A. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 123. P. 379–389. doi: 10.1016/j.psep.2019.01.006

10. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Salamov J. Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface. Naukovyi Visnyk NHU. 2019. № 4. P. 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16

11. Oliinik V., Basmanov O. Model of spreading and burning the liquid on the soil, Problems of emergency situations. 2023. № 1(37). P. 18–30. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-2

12. Abramov Y., Basmanov O., Khmyrov I., Oliinik V. Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid in filtration in bulk material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4. № 10(118). P. 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249

13. Abramov Y., Basmanov O., Oliinik V., Khmyrov I., Khmyrova A. Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire a trail way accidence. EUREKA: Physics and Engineering. 2022. № 6. P. 128–138. doi: 10.21303/2461-4262.2022.002702

Надійшла до редколегії: 07.03.2024
Прийнята до друку: 12.04.2024

© Y. Kalchenko, K. Afanasenko, S. Vavreniuk, D. Pisklova

УДК 614.841

Р. І. Коваленко, *к.т.н., доц. каф. (ORCID 0000-0003-2083-7601)*
С. Ю. Назаренко, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-0891-0335)*
Е. І. Михлюк, *к.психол.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-4850-3566)*
К. М. Остапов, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1275-741X)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ В МІСТАХ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

Досліджено процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб. Предметом дослідження є статистичні закономірності, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб. Опрацьовано дані про пожежі, які виникали за період з 2021 по 2023 рік. Окремо досліджувалися статистичні дані по кожному місту і по кожному року. Серед статистичних закономірностей розглядалися нормальні та дискретні закони розподілу, а саме: нормальний, експоненційний, гамма, логнормальний, хі-квадрат, Пуассона та геометричний. Очікувалося, що найімовірніше процес виникнення пожеж може бути описаний законом розподілу Пуассона, враховуючи те, що у багатьох з попередньо аналізованих робіт так вважалося. Встановлено, що ні до введення воєнного стану ні після його введення процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб не може бути описаний законом розподілу Пуассона. Натомість в окремих випадках цей процес може бути описаний експоненційним законом розподілу, що не зовсім є зрозумілим. Крім цього, не виявлено залежності між розрахованими значеннями стандартного відхилення і досліджуваними статистичними закономірностями виникнення пожеж. Дослідження обмежується тим, що не можна порівняти отримані результати з іншими подібними, які виконувалися в період з 2021 по 2023 рік для інших міст світу. Основним недоліком цих досліджень є те, що можливість отримання статистичних даних про пожежі за попередні періоди по містам України є обмеженою. Відповідно це не дозволяє визначити, якими статистичними законами розподілу описувався або не описувався процес виникнення пожеж в той період часу. В подальшому планується дослідити можливість встановлення закону розподілу для процесу виникнення пожеж в містах з чисельністю населення менше 500 тисяч осіб.

Ключові слова: пожежа, воєнний стан, гіпотеза, закон розподілу, аварійно-рятувальне формування, критерій Пірсона

1. Вступ

В мирний час і під час воєнного стану процес виникнення пожеж відрізняється. Під час воєнного стану на кількість пожеж, які виникають в населених пунктах, впливає ряд чинників, зокрема, міграція населення та ворожі обстріли території. Через це, статистичні закономірності, які дозволяли описати названий процес в мирний час, під час воєнного стану можуть не виконуватися. З цієї причини ускладнюється можливість прогнозування пожеж на певний період часу. Точний прогноз пожеж потрібний для визначення необхідної кількості сил та засобів з метою успішного реагування на них, а також проведення профілактичних заходів щодо їх запобігання.

Отже, дослідження виникнення пожеж під час воєнного стану є актуальним. Отримані результати можуть бути використані для опису вказаного процесу математичними моделями і їх подальшого застосування для прогнозування кількості пожеж.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [1] пропонується оцінювати рівень готовності аварійно-рятувальних формувань (АРФ) комплексним показником, який ґрунтується на врахуванні декількох імовірнісних показників. Ці імовірнісні показники визначаються з використанням

методів теорії ймовірності та математичної статистики. Підходи щодо визначення цих показників були сформовані до введення воєнного стану, тому не можна стверджувати про їх адекватність в існуючих умовах.

В [2] для прогнозування кількості пожеж в лісах на короткий термін пропонується використовувати методи регресійного аналізу. На кількість лісових пожеж сильно впливає таке явище як посуха, яка має сезонний характер. За результатами цих досліджень було встановлено, що короткострокові прогнози на декілька місяців наперед мають достатню точність. Натомість в [3] під час застосування описаного раніше методу для прогнозування кількості лісових пожеж на наступний сезон було отримано не зовсім достовірний результат, що підтверджує значення коефіцієнта кореляції – 0,49.

В [4] для прогнозування кількості пожеж в містах пропонується застосовувати метод нейронних мереж. Для цього була розроблена нова модель глибокого послідовного навчання мережі при застосуванні якої, як стверджується в цій роботі, можна отримати достатньо точний прогноз пожеж на майбутній період.

Використання методу нейронних мереж також пропонується і для прогнозування кількості дорожньо-транспортних пригод [5]. Водночас в цій роботі наведені обмеження щодо застосування цього методу прогнозування, а саме вказано, що він не може бути застосований для отримання чітких і точних результатів з різними складними обчисленнями. Це пов’язано з тим, що нейронні мережі є відображенням людського мозку, який, у свою чергу, не пристосований до точної роботи з числами. Крім того, нейронні мережі оперують так званими нечіткими поняттями, що також не завжди дозволяє отримати однозначні результати. Навчання нейронної мережі у вказаній роботі проводилося з використання статистичних даних про дорожньо-транспортні пригоди за період, що охоплював декілька років. На цей час також припав період пандемії COVID-19, що вплинуло на статистику виникнення дорожньо-транспортних пригод і, як наслідок, мало вплив на результати отриманого прогнозу.

В [6] з метою мінімізації часу прибуття підрозділів АРФ на виклики пропонується підхід, який полягає у перерозподілі впродовж доби відділень на оперативних транспортних засобах по території міста. Відповідно залежно від часу доби в різних районах міста імовірність викликів, зокрема, тих які пов’язані з виникненням пожеж є різною. Враховуючи це, вказаний підхід передбачає можливість зосередження в районах з більшою ймовірністю викликів більшої кількості відділень на оперативних транспортних засобах для мінімізації часу прибуття. Для визначення ймовірності виникнення викликів і залучення на них певної кількості відділень на оперативних транспортних засобах використовується закон розподілу Пуассона. В умовах воєнного стану через зміну умов гіпотеза про те, що потік викликів, який надходить до підрозділів АРФ відповідає закону розподілу Пуассона потребує перевірки.

В [7] запропоновано метод комплектування АРФ оперативними транспортними засобами при вирішенні задачі їх технічного переоснащення. Названий метод полягає у виконанні чотирьох послідовних етапів. Одним із цих етапів є визначення загальної чисельності оперативних транспортних засобів для АРФ населеного пункту. Для цього використовується математична модель, яка ґрунтуються на пуассонівському законі розподілу. При дослідженні потоку викликів, які надходили до підрозділів АРФ м. Харків було встановлено, що він саме є пуассонівським але під час воєнного стану це потребує перевірки.

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

У [8] пропонується виконувати прогнозування нещасних випадків на будівництві за допомогою моделі розподілу Пуассона. Для цього в роботі були проаналізовані статистичні дані за період з 2000 до 2013 року з метою встановлення частоти виникнення нещасних випадків. За результатами досліджень встановлено, що з використанням розподілу Пуассона можна отримати достатньо достовірну ймовірність виникнення нещасних випадків на будівництві.

В [9] досліджується рівень достовірності застосування регресії Пуассона для прогнозування різних випадкових подій. Точність прогнозу залежить від розміру вибірки та стандартного відхилення. За малих розмірів вибірки та великого стандартного відхилення результати прогнозування із застосуванням регресії Пуассона є найгіршими.

В [10] досліджувалися статистичні закономірності виникнення пожеж під час воєнного стану в містах. Основна гіпотеза досліджень полягала у тому, що кількість пожеж, які періодично виникають на території міст під час дії воєнного стану може бути описана законом розподілу Пуассона, а часові інтервали між моментами виникнення пожеж експоненційним законом розподілу. Як виявилося першу частину гіпотези підтвердити не вдалося, а щодо другої встановлено, що лише для 35 % від загальної кількості аналізованих міст висунута статистична гіпотеза про можливість опису часових інтервалів між моментами виникнення пожеж експоненційним законом розподілу була підтвердженою. Отримання таких результатів може бути пов’язано з тим, що для досліджень були використані статистичні дані лише за період 2022 року. Крім цього, досліджувалася статистика пожеж в містах України, які перебувають поблизу лінії розмежування. Відповідно для окремих міст в яких кількість пожеж за рік була невеликою розмір вибірки також був невеликим, що могло вплинути на кінцеві результати.

Отже, для прогнозування кількості пожеж використовуються різні методи до яких можна віднести регресійний аналіз [2, 3], метод нейронних мереж [4, 5] та ймовірнісні методи, які ґрунтуються на законі розподілу Пуассона [6–10]. Кожен з названих методів має певні обмеження та недоліки. Доволі часто для прогнозування кількості пожеж або інших небезпечних подій та надзвичайних ситуацій застосовуються ймовірнісні методи, які ґрунтуються на законі розподілу Пуассона. Поряд з цим для отримання достовірних результатів і встановлення вказаного ймовірнісного закону розподілу повинен бути достатній розмір вибірки [9, 10]. Крім цього, можливість опису процесу виникнення пожеж під час воєнного стану пуассонівським законом розподілу залишається малодослідженою.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є те, що залишається недослідженим процес виникнення пожеж під час воєнного стану.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є встановлення статистичних закономірностей, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– встановити статистичний закон розподілу, який дозволяє описати кількість пожеж, які виникають в містах з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб до введення воєнного стану;

– встановити статистичний закон розподілу, який дозволяє описати кількість пожеж, які виникають в містах з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб після введення воєнного стану.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб. Предметом дослідження є статистичні закономірності, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що процес виникнення пожеж в містах може бути описаний статистичними закономірностями.

Досліджувалися статистичні дані про пожежі, які виникали в містах Київ, Дніпро, Одеса, Харків, Кривий Ріг, Запоріжжя та Львів за період з 2021 по 2023 рік. Для опрацювання статистичних даних було використано табличний редактор Microsoft Excel, а для перевірки висунутих статистичних гіпотез програмний продукт STATISTICA 6.0. У якості критерію узгодженості було використано критерій Пірсона.

5. Встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж до введення воєнного стану

Для цього дослідження були опрацьовані статистичні дані про пожежі, які виникали у вказаних раніше містах України за період 2021 року. Визначалася щоденна кількість пожеж впродовж аналізованого року, тобто вибірка даних складала 365. Ці дані аналізувалися окремо по кожному місту. Дані щодо розрахованих значень показників середнього арифметичного та стандартного відхилення по кожній із груп вибірки наведені в табл. 1.

Табл. 1. Характеристика значень вибірки (2021 рік)

Місто	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення
Київ	13,6	5,7
Львів	1,5	1,5
Дніпро	2,5	3
Харків	5	4
Одеса	3,4	2,3
Кривий Ріг	2,8	2,7
Запоріжжя	6,3	4,7

З використанням програмного продукту STATISTICA 6 було проведено перевірку висунутих статистичних гіпотез. Результати цього дослідження наведені в табл. 2. У випадках, коли критичне значення критерію Пірсона менше розрахункового статистична гіпотеза вважається підтвердженою.

З даних, які наведені в табл. 2 можна зробити висновок, що для більшості з досліджуваних міст не вдалося встановити закон розподілу, який міг би описати процес виникнення пожеж.

6. Встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж після введення воєнного стану

Для цього дослідження були опрацьовані статистичні дані про пожежі, які виникали у містах України за період 2022 та 2023 років. Окремо аналізувалися дані по кожному року і по кожному місту. Вибірка даних складала 365. Розраховані значення показників середнього арифметичного та стандартного відхилення по кожній із груп вибірки наведені в табл. 3 і табл. 4.

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

Табл. 2. Результати перевірки статистичних гіпотез (2021 рік)

Київ			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	23,46538	3	7,8
Експоненційний	275,37619	7	14,1
Гамма	8,49086	3	7,8
Логнормальний	23,65635	4	9,5
Хі-квадрат	30,12175	4	9,5
Пуассона	93,57018	2	6
Геометричний	323,89977	7	14,1
Львів			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	160,38059	4	9,5
Експоненційний	21,14044	5	11,1
Гамма	36,44498	3	7,8
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	14,3004	5	11,1
Пуассона	21,1199	4	9,5
Геометричний	49,04362	6	12,6
Дніпро			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	204,51679	4	9,5
Експоненційний	6,77778	4	9,5
Гамма	-	-	-
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	15,01562	3	7,8
Пуассона	605,36485	3	7,8
Геометричний	34,95547	5	11,1
Харків			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	60,69482	1	3,8
Експоненційний	14,62929	3	7,8
Гамма	74,70633	3	7,8
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	6,51888	1	3,8
Пуассона	114,47788	1	3,8
Геометричний	57,55082	4	9,5
Одеса			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	95,17499	8	15,5
Експоненційний	33,68559	10	18,3
Гамма	133,16453	10	18,3
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	24,50028	9	16,9
Пуассона	75,6504	7	14,1
Геометричний	123,37792	11	19,7

Продовження табл. 2

Кривий Ріг			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	72,97257	7	14,1
Експоненційний	6,85687	7	14,1
Гамма	7,69601	6	12,6
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	20,12229	6	12,6
Пуассона	34,69207	5	11,1
Геометричний	22,0335	7	14,1
Запоріжжя			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	37,76537	7	14,1
Експоненційний	16,55568	8	15,5
Гамма	120,85438	7	14,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	79,44458	6	12,6
Пуассона	177,29823	4	9,5
Геометричний	38,96291	9	16,9

Табл. 3. Характеристика значень вибірки (2022 рік)

Місто	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення
Київ	8,6	5,1
Львів	1,8	1,6
Дніпро	3,3	2,9
Харків	5,3	5,7
Одеса	3,4	2,2
Кривий Ріг	3,8	3,1
Запоріжжя	3,7	3,1

Табл. 4. Характеристика значень вибірки (2023 рік)

Місто	Середнє арифметичне	Стандартне відхилення
Київ	9,5	4,8
Львів	1,7	1,8
Дніпро	3,2	2,5
Харків	3,6	2,5
Одеса	3,6	2,4
Кривий Ріг	4,2	4,1
Запоріжжя	3,7	3,3

Перевірка висунутих статистичних гіпотез проводилася з використанням програмного продукту STATISTICA 6. Результати цього дослідження наведені в табл. 5 і табл. 6. У випадках, коли критичне значення критерію Пірсона менше розрахункового статистична гіпотеза вважається підтвердженою.

З даних, які наведені в табл. 5 і табл. 6 можна зробити висновок, що для більшості з досліджуваних міст не вдалося встановити закон розподілу, який міг би описати процес виникнення пожеж на їх території у 2022 та 2023 роках.

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

Табл. 5. Результати перевірки статистичних гіпотез (2022 рік)

Київ			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	36,92193	2	6
Експоненційний	113,17378	5	11,1
Гамма	121,47904	5	11,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	20,17512	3	7,8
Пуассона	143,8424	2	6
Геометричний	167,72636	7	14,1
Львів			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	89,56063	4	9,5
Експоненційний	15,7025	6	12,6
Гамма	15,43674	5	11,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	14,14245	6	12,6
Пуассона	18,08894	4	9,5
Геометричний	67,72267	7	14,1
Дніпро			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	102,69689	4	9,5
Експоненційний	11,27121	5	11,1
Гамма	9,53394	4	9,5
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	20,84655	4	9,5
Пуассона	67,72507	3	7,8
Геометричний	69,63733	6	12,6
Харків			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	235,17672	2	6
Експоненційний	22,17584	3	7,8
Гамма	56,21342	1	3,8
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	68,80012	1	3,8
Пуассона	285,1321	1	3,8
Геометричний	54,42492	4	9,5
Одеса			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	66,64552	8	15,5
Експоненційний	43,41153	10	18,3
Гамма	21,93127	9	16,9
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	23,88218	9	16,9
Пуассона	30,39376	7	14,1
Геометричний	138,8071	11	19,7

Продовження табл. 5

Кривий Ріг			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	91,75481	4	9,5
Експоненційний	7,80061	6	12,6
Гамма	-	-	-
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	35,8365	5	11,1
Пуассона	231,64891	4	9,5
Геометричний	49,06064	7	14,1
Запоріжжя			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	108,66202	4	9,5
Експоненційний	7,09547	6	12,6
Гамма	55,25619	6	12,6
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	29,93472	4	9,5
Пуассона	102,74879	3	7,8
Геометричний	55,3212	7	14,1

Табл. 6. Результати перевірки статистичних гіпотез (2023 рік)

Київ			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	90,29119	9	16,9
Експоненційний	205,14184	13	22,4
Гамма	28,86178	9	16,9
Логнормальний	35,66051	8	15,5
Хі-квадрат	35,66051	8	15,5
Пуассона	161,46401	6	12,6
Геометричний	268,0052	14	23,7
Львів			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	93,33868	2	6
Експоненційний	18,34195	2	6
Гамма	18,55391	1	3,8
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	18,20022	2	6
Пуассона	11,01843	2	6
Геометричний	86,84661	4	9,5
Дніпро			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	117,55078	8	15,5
Експоненційний	15,37755	10	18,3
Гамма	-	-	-
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	27,5612	8	15,5
Пуассона	94,88519	7	14,1
Геометричний	92,79708	11	19,7

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

Продовження табл. 6

Харків			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	61,31916	3	7,8
Експоненційний	40,52488	6	12,6
Гамма	143,20018	6	12,6
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	10,40009	4	9,5
Пуассона	28,04142	3	7,8
Геометричний	127,13458	7	14,1
Одеса			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	67,89045	8	15,5
Експоненційний	53,13585	11	19,7
Гамма	101,37635	7	14,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	24,80473	9	16,9
Пуассона	34,58495	7	14,1
Геометричний	146,88481	12	21
Кривий Ріг			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	202,11244	6	12,6
Експоненційний	11,79953	6	12,6
Гамма	54,00658	5	11,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	107,18877	5	11,1
Пуассона	310,94344	4	9,5
Геометричний	50,20076	8	15,5
Запоріжжя			
Закон розподілу	Розрахункове значення критерію Пірсона	Число степенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Нормальний	138,03005	5	11,1
Експоненційний	6,933	6	12,6
Гамма	50,97996	7	14,1
Логнормальний	-	-	-
Хі-квадрат	41,27357	5	11,1
Пуассона	234,64705	4	9,5
Геометричний	54,42769	7	14,1

7. Обговорення результатів встановлення статистичного закону розподілу кількості пожеж

Враховуючи те, що з часом змінюється чисельність населення, особливості забудови та з'являються або зникають окремі об'єкти в місті – це має вплив і на процес виникнення пожеж. Крім цього, на даний процес також вплинуло введення воєнного стану і обстріли міст. Відповідно, не завжди процес виникнення пожеж може бути описаний відомими статистичними закономірностями, серед яких розглядалися нормальні та дискретні закони розподілу, а саме: нормальний, експоненційний, гамма, логнормальний, хі-квадрат, Пуассона та геометричний. Очікувалося, що найімовірніше вказаний процес може бути описаний саме законом розподілу Пуассона, враховуючи те, що у багатьох з попередньо аналізованих робіт так вважалося. Встановлено, що ні до введення воєнного стану ні після його введення процес виникнення пожеж в містах України з чисельністю населення

понад 500 тисяч осіб не може бути описаний законом розподілу Пуассона. Натомість в окремих випадках цей процес може бути описаний експоненційним законом розподілу, що не зовсім є зрозумілим. Відомо, що закон розподілу Пуассона і експоненційний закон розподілу пов'язані між собою. Вважається, що у випадку коли потік викликів є пуассонівським, часові інтервали між їх настанням і їх тривалість можна описати експоненційним законом розподілу. Крім цього, не виявлено залежності між розрахованими значеннями стандартного відхилення і досліджуваними статистичними закономірностями виникнення пожеж. Імовірно, що в сучасних умовах, які пов'язані з переміщенням населенням через війну, виникненням пожеж через обстріли територій ворожими військами, проблемами з роботою об'єктів критичної інфраструктури динаміка кількості пожеж суттєво змінилася. Вказані причини могли вплинути на те, що процес виникнення пожеж не вдалося описати жодним із перелічених раніше законів розподілу.

Порівняно з раніше відомими результатами досліджень потоку пожеж, які виникали в містах вдалося встановити, що саме в умовах воєнного стану досить складно описати цей процес і це викликає потребу пошуку або розробки для цього інших підходів.

Дослідження обмежується тим, що не можна порівняти отримані результати з іншими подібними, які виконувалися в період з 2021 по 2023 рік для інших міст світу через відсутність у вільному доступі такої статистичної інформації.

Основним недоліком цих досліджень є те, що можливість отримання статистичних даних про пожежі за попередні періоди по містам України є обмеженою. Відповідно це не дозволяє визначити, якими статистичними законами розподілу описувався або не описувався процес виникнення пожеж в той період часу.

В подальшому планується дослідити можливість встановлення закону розподілу для процесу виникнення пожеж в містах з чисельністю населення менше 500 тисяч осіб.

8. Висновки

1. Встановлено, що щоденна кількість пожеж, які виникали в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб у 2021 році до введення воєнного стану не може бути описана законом розподілу Пуассона. Лише для міст Дніпро та Кривий Ріг вдалося встановити закон розподілу, що становить тільки 29 % від загальної чисельності міст, які досліджувалися. Цим законом розподілу виявився експоненційний. У якості критерію узгодженості було використано критерій Пірсона. Це може бути пов'язано з тим, що в населених пунктах через зміну чисельності населення, зростання щільності забудови, виникнення нових суб'єктів підприємницької діяльності та ще через ряд інших причин. Імовірно, що в сучасних умовах для кожного із населених пунктів необхідно проводити встановлення закону розподілу.

2. Встановлено, що щоденна кількість пожеж, які виникали в містах України з чисельністю населення понад 500 тисяч осіб у 2022 та 2023 роках після введення воєнного стану не може бути описана законом розподілу Пуассона. У 2022 році лише для міст Кривий Ріг та Запоріжжя вдалося встановити експоненційний закон розподілу. У 2023 році кількість пожеж, які виникали в містах Дніпро, Кривий Ріг та Запоріжжя може бути також описана експоненційним законом розподілу. Відомо, що закон розподілу Пуассона і експоненційний закон розподілу пов'язані між собою. Вважається, що у випадку коли потік викликів є пуассонівським, часові інтервали між настанням подій і їх тривалість можна описати експоненційним законом розподілу. Через це залишається не зрозуміло, чому щоденна кількість пожеж, які виника-

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

ли в окремих містах України описується саме експоненційним законом розподілу і чому цей процес загалом не може бути описаний законом розподілу Пуассона.

Література

1. Tiutiunyk V., Ivanets H., Tolkunov I., Stetsyuk E. System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. № 1. P. 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7

2. Gudmundsson L., Rego F., Rocha M., Seneviratne S. Predicting above normal wildfire activity in southern Europe as a function of meteorological drought. Environmental Research Letters. 2014. Vol. 9. 084008. doi: 10.1088/1748-9326/9/8/084008

3. Marcos R., Turco M., Bedía J., Llasat M. C., Provenzale A. Seasonal predictability of summer fires in a Mediterranean environment. International Journal of Wildland Fire. 2015. № 24(8). P. 1076–1084. doi: 10.1071/WF15079

4. 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

5. Gorzelanczyk P. Using neural networks to forecast the number of road accidents in Poland taking into account weather conditions. Results in Engineering. 2023. № 17. 100981. doi: 10.20858/sjsutst.2023.118.4

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. Kovalenko R., Kalynovskyi A., Nazarenko S., Kryvoshei B., Grinchenko E., Demydov Z., Mordvyntsev M., Kaidalov R. Development of a method of completing emergency rescue units with emergency vehiclesdoi. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. № 3(100). P. 54–62. doi: 10.15587/1729-4061.2019.175110

8. 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.

9. 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

10. 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.

R. Kovalenko, *PhD, Associate Professor of the Department*
S. Nazarenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
E. Muhlyk, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
K. Ostapov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

PATTERNS OF THE OCCURRENCE OF FIRES IN CITIES DURING MARITAL STATE

The process of occurrence of fires in Ukrainian cities with a population of more than 500000 people was studied. The subject of the study is statistical patterns that allow us to describe the process of fire occurrence in Ukrainian cities with a population of more than 500000 people. Data on fires that occurred in the period from 2021 to 2023 have been processed. Statistical data for each city and each year were studied separately. Among statistical regularities, normal and discrete laws of distribution were considered, namely: normal, exponential, gamma, lognormal, chi-square, Poisson and geometric. It was expected that the process

of the occurrence of fires can be described by the Poisson distribution law, given that many of the previously analyzed works considered this to be the case. It was established that neither before the introduction of martial law nor after its introduction, the process of occurrence of fires in Ukrainian cities with a population of more than 500000 people cannot be described by the Poisson distribution law. Instead, in some cases, this process can be described by an exponential distribution law, which is not entirely clear. In addition, no dependence was found between the calculated values of the standard deviation and the investigated statistical regularities of the occurrence of fires. The study is limited by the fact that it is not possible to compare the obtained results with other similar studies carried out between 2021 and 2023 for other cities around the world. The main drawback of these studies is that the possibility of obtaining statistical data on fires for previous periods in the cities of Ukraine is limited. Accordingly, it does not allow determining which statistical laws of distribution described or did not describe the process of the occurrence of fires in that time period. In the future, it is planned to investigate the possibility of establishing a distribution law for the process of fire occurrence in cities with a population of less than 500000 people.

Keywords: fire, statistical hypothesis, law of distribution, emergency and rescue formation, Pearson's test

References

1. Tiutiunyk, V., Ivanets, H., Tolkunov, I., Stetsyuk, E. (2018). System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 1, 99–105. doi: 10.29202/nvngu/2018-1/7

2. Gudmundsson, L., Rego, F., Rocha, M., Seneviratne, S. (2014). Predicting above normal wildfire activity in southern Europe as a function of meteorological drought. Environmental Research Letters, 9, 084008. doi: 10.1088/1748-9326/9/8/084008

3. Marcos, R., Turco, M., Bedía, J., Llasat, M. C., Provenzale, A. (2015). Seasonal predictability of summer fires in a Mediterranean environment. International Journal of Wildland Fire, 24(8), 1076–1084. doi: 10.1071/WF15079

4. 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

5. Gorzelanczyk, P. (2023). Using neural networks to forecast the number of road accidents in Poland taking into account weather conditions. Results in Engineering, 17, 100981. doi: 10.20858/sjsutst.2023.118.4

6. Usanov, D., Legemaate, G., 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 Usanov D., G. A. Guido Legemaate, Peter M.

7. Kovalenko, R., Kalynovskyi, A., Nazarenko, S., Kryvoshei, B., Grinchenko, E., Demydov, Z., Mordvyntsev, M., Kaidalov, R. (2019). Development of a method of completing emergency rescue units with emergency vehiclesdoi. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 3(100), 54–62. doi: 10.15587/1729-4061.2019.175110

8. 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. Florida: Walt Disney World, 513–523.

9. 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

10. Kovalenko, R. I., Nazarenko, S. Yu., Mykhlyuk, E. I., Semkiv, V. O. (2023). Statystychni zakonomirnosti vynyknennya pozhezh v mistakh pid chas voyennoho stanu. Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy, 2(38), 194–207.

Надійшла до редколегії: 05.03.2024
Прийнята до друку: 18.04.2024

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, К. М. Остапов

УДК 629.113.012.5.004.6

В. Б. Коханенко, *к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0001-5555-5239)*
Б. І. Кривошей, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2561-5568)*

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРНИХ ДЕФЕКТІВ ШИН ПОЖЕЖНИХ АВТОЦИСТЕРН ТА МЕТОДИКА ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Визначені характерні дефекти шин, котрі виникають через специфічні режими експлуатації аварійно-рятувальних машин і пожежних автоцистерн, розроблена методика по їх визначенню в умовах роботи державних пожежно-рятувальних частин. На-сьогодні, стан шин визначають в дослідницьких лабораторіях та за допомогою спеціального обладнання. Контроль за шинами, котрі знаходяться в експлуатації підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій, не проводиться. Встановлено, що більшість шин пожежних автоцистерн знаходяться в експлуатації довше, ніж вказано заводом-виробником, оскільки мають ще незношений протектор. Отже, внутрішній стан таких шин ненадійний, з наявними дефектами, з втомою гумового матеріалу шини, котрі не можливо виявити без спеціального обладнання. Обставини, пов'язані з проведенням воєнних дій, призводять до руху пожежних автоцистерн по пошкодженій (в результаті ворожих обстрілів) поверхні дороги, на підвищеній швидкості руху та з ваговими перевантаженнями, що впливає на перевищення температурного стану шин. Висока температура прискорює розростання дефектів до критичних розмірів та призводить до руйнування шин. Отже, слідкувати за їх зовнішнім станом замало, оскільки в шинах накопичуються внутрішні втомливі руйнування та дефекти виробництва. В результаті проведених досліджень встановлено, що теплове випромінювання шини вказує на наявність внутрішніх руйнувань, тобто, дає змогу визначати її цілісність. Вирішено науково-практичне завдання по створенню методики визначення прихованих дефектів в шині. Розроблена методика визначення прихованих дефектів саме в шинах пожежних автоцистерн дозволить визначати їх експлуатаційну придатність. Результати досліджень, підвищать безпеку слідування пожежних автоцистерн до місця виклику та під час виконання дій за призначенням. Ці дані є дуже важливими, оскільки знижують вірогідність непередбаченого раптового виходу шин пожежних автоцистерн з експлуатації.

Ключові слова: пожежна автоцистерна, радіальна шина, теплове випромінювання, дефекти, надійність, розшарування, безпека

1. Вступ

Експлуатація спеціального аварійно-рятувального та пожежного транспорту в сьогоднішніх умовах, супроводжених воєнними діями, викликає багато складнощів. Це як умови слідування до місця виклику, так і проведення дій за призначенням під час обстрілів, а також рух по пошкодженій в результаті обстрілів поверхні дороги і слідування на підвищених швидкостях руху з ваговими перевантаженнями. Тому на шини аварійно-рятувальних машин та пожежних автоцистерн діють значні, непередбачені заводом-виробником, навантаження. Через порушення правил експлуатації збільшилась кількість виходів шин з експлуатації, а саме по причині наявних в ній внутрішніх прихованих дефектів, котрі призводять до руйнування шин.

Таким чином, передчасне руйнування шин пожежних автоцистерн є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У загальному вигляді принцип термометричної діагностики подають у вигляді ідентифікації аномального розподілу температур з еталонними, які відповідають різним видам дефектів.

Аналіз основних факторів, які викликають передчасний вихід шин з експлуатації показує, що значний відсоток руйнувань радіальних шин, котрі встанов-

люються на пожежних автоцистернах, відбувається саме через дефекти виробництва, а це і є внутрішні дефекти шин [1].

В роботі [1] встановлено, що основна робота, яка затрачується на кочення шини, перетворюється в тепло, яке викликає загальне підвищення температури шини. Критичною температурою в шині, яка утворює розрив ниток корда є перевищення температури вулканізації шини, а саме 115 °С. Але авторами не розглядаються питання розподілу тепла по поверхні шини.

В [2] визначено, що інтенсивність теплоутворення в шині яскраво проявляється на початку руху шини, при збільшенні швидкості кочення, коли її температура дорівнює температурі навколишнього середовища. У цей момент теплоутворення значно більше тепловіддачі, і температура шини швидко зростає. Тому визначати конструктивні особливості шин бажано на початку їх кочення. Нажаль, в роботі не розглядається питання впливу дефектів на теплове поле шини.

В роботі [3] встановлено, що з підвищенням температури тепловіддача зростає, темп зростання температури сповільнюється. Таким чином, розподіл температури може характеризувати наявність прихованих дефектів таких, як їх порожнини, тріщини, додаткові джерела тепла. Однак, автори не розглядають питання подальшого розростання дефектів, котрі потім досягають критичних розмірів і через ці дефекти шина руйнується.

Дані роботи [5] свідчать про те, що автори досліджували властивості міцності та питання вдосконалення каркасу шин транспортних автомобілів в спокійних умовах експлуатації. Але ж для шин пожежних автоцистерн притаманні екстремальні умови експлуатації, котрі супроводжуються значними перевантаженнями. Тому, слід провести додаткові дослідження.

Як вказано в роботі [6], процес взаємодії шини з дорогою можливо описати за допомогою кінцевих елементів. Однак, авторами розглядаються умови експлуатації шини без дефектів, котрі притаманні шинам з металокордом в брекері і котрі встановлюються на пожежних автоцистернах.

Фізичні властивості шинних матеріалів, як слідує з роботи [7], розглядають в стаціонарних умовах експлуатації, без можливих дефектів їх виготовлення і поєднання в загальній конструкції шини. Ці обставини вимагають уточнень і для застосування в роботі недостатні.

Автор [8] роботи стверджує, що вже існує подібна модель шини, з урахуванням особливостей її конструкції, а саме анізотропних властивостей. Однак, питання розробки спеціальної моделі шини для особливих умов експлуатації, притаманних шинам пожежних автоцистерн, не розглядаються.

З результатів досліджень [9] роботи слідує, що автори вже розглядали питання безпеки експлуатації пожежних автоцистерн, однак, їх увазі підлягала зміна конструкції шини та її вплив на термонапружений стан шини, що досліджується. Питання впливу внутрішніх дефектів на температурні поля шини, можливий пошук цих дефектів не висвітлювалися.

Таким чином, постала необхідність у з’ясуванні впливу дефектів шини на її загальне теплове поле, можливості їх визначення й своєчасного вилучення з експлуатації шин з критичними дефектами, і, як наслідок, – підвищенню безпеки експлуатації та успішному виконанню дій за призначенням на пожежних автоцистернах.

Тому, виникає необхідність розробки методики, підбір приладів і обладнання для встановлення якісного контролю за станом шин пожежних автоцистерн в умовах ДПРЧ.

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є з'ясування впливу дефектів в елементах шин вантажних автомобілів на безпеку руху пожежних автоцистерн та визначення їх місця знаходження.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

– проаналізувати фактори, котрі обмежують пробіг шин пожежних автоцистерн;

– дослідити вплив дефектів в шині на її температурне поле;

– розробити методику визначення прихованих дефектів шин пожежних автоцистерн.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – шина пожежних автоцистерн з наявними дефектами.

Предметом дослідження є взаємодія шин пожежних автоцистерн з дорожньою поверхнею під час руху та вплив на неї режимів експлуатації, внутрішніх дефектів та зовнішніх небезпечних факторів під час виконання дій за призначенням.

Робочою гіпотезою було прийнято те, що на безпечну взаємодію шини з опорною поверхнею впливають внутрішні дефекти в шині, прояви зовнішніх небезпечних факторів навколишнього середовища та режимів експлуатації шини.

Інженерні методи оцінки надійності та ресурсу шини базуються на напівемпіричних відношеннях та правилах.

Механізм руйнування шини представлено в вигляді накопичення відносних переміщень шарів шини між собою, каркасом та протектором.

В роботі використовувалися наукові методи фізичного й математичного моделювання, теорія планування експерименту, теорія вірогідностей.

Методи дослідження наявності дефекту всередині шини за температурними полями на її зовнішній поверхні з визначенням місць розташування внутрішніх дефектів представляють практичну значимість отриманих результатів.

Експериментальні дослідження проводилися на барабанному стенді для обкатки шин, представленому на рис. 1 та з комплектом вимірювальної, перетворюючої та фіксуючої апаратури [4].

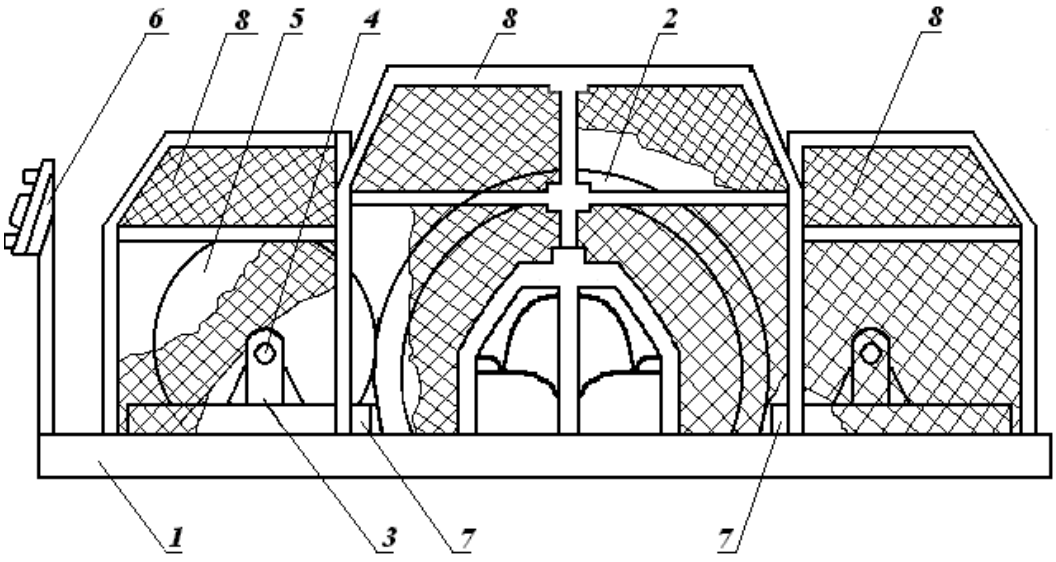


Рис. 1. Барабанний шинообкаточний стенд: 1 – рама стенда; 2 – сталевий барабан зварної конструкції; 3 – кронштейн каретки; 4 – вал каретки; 5 – колесо, що досліджується; 6 – пульт керування стендом; 7 – притискні каретки; 8 – захисні сітки

На рамі стенду 1 встановлений сталевий барабан 2 зварної конструкції з клинопасовим приводом від електродвигуна. До поверхні барабана з однією зі сторін притиснуто випробуване колесо 5, встановлене на кронштейнах 3 каретки 7, що дозволяє переміщати колесо в горизонтальному напрямку.

Шина з датчиками деформацій та термопарами закріплюються на валу каретки. Виводи датчиків і термопар за допомогою струмознімального пристрою з'єднуються з вимірювальною та реєструючою апаратурою. Конструкція стенду дозволяє змінювати і реєструвати силу притискання колеса з шиною до барабана. Наявність тиристорного блоку в керуванні електродвигуном стенду дозволяє плавно збільшувати та зменшувати швидкість кочення колеса в межах, що відповідають руху колеса на автомобілі від 0 до 60 м/с. Збиралися шини на заводі виробничого об'єднання «Білоцерковшина». Місця встановлення термопар представлені в [9].

Наведена конструкція стенду дозволяє випробовувати різні моделі та типорозміри шин при заданих режимах навантаження та швидкості.

Враховуючи, що у загонах технічної служби є стенди з біговими барабанами, у роботі пропонується визначати технічний стан шин саме за допомогою подібних стендів.

5. Результати аналізу факторів, котрі обмежують пробіг шин пожежних автоцистерн

В багатьох елементах шини вже на стадії виготовлення виникають внутрішні дефекти, які в процесі експлуатації під дією значних перевантажень поглиблюються і внаслідок цього спричиняють раптове руйнування.

Фактори, що обмежують пробіг шини розглянемо по наступним групам:

– вплив зовнішніх і штучних факторів;

– дія факторів, обумовлених технологічним процесом;

– вади, що їх допускають під час виготовлення шини;

– фактори порушення правил експлуатації.

В роботі розглядається лише вплив на шини зовнішніх і штучних факторів та порушення правил експлуатації, оскільки ці фактори неминучі під час виконання дій за призначенням на пожежних автоцистернах.

Вплив зовнішніх і штучних факторів.

Сліди порізів на протекторі шини. Місцеві порізи можливі при експлуатації на шляхах, покритих гострим щебенем, на будівельних майданчиках та на кам'янистих шляхах.

Протектор може мати ще такі пошкодження як проколи, наскрізні порізи, пошкодження боковин, відшарування протектора, вирив частини протектора, які можливо отримати при наїзді на гострі предмети та на бордюр.

Відшарування шару гуми на боковинах протектора, який потім тріскається і оголює корд. Він виникає через наїзд на гостре або під час руху при зниженому тиску, або через перевантаження.

Пошкодження поверхневого шару боковини шини, яке відбувається на здвоєних колесах, якщо шини в контакті з дорогою деформуються так, що стискуються одна з одною, швидше за все через перевантаження.

Кільцевий поріз боковини шини, по колу шини, якщо шина торкається ресори, рульової тяги.

Пошкодження боковини шини через удари по бордюру.

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

Мікротріщини на боковинах шини через старіння (тривалий час експлуатації) або під впливом нафтопродуктів, чи від проведення зварювальних робіт, від теплового випромінювання пожежі.

Пошкодження каркасу шини, а саме:

– розрив каркаса (через напруження, котрі перевищили граничні, нитки каркаса рвуться, поряд розташовані нитки теж рвуться від збільшених деформацій і підвищеного навантаження);

– пошкодження шарів каркасу через потрапляння в середину шини вологи, бруду, піску, які пошкоджують та послаблюють каркас, який потім розривається від удару.

Розшарування каркасу проходе від борта до борта, окремі його нитки відокремлюються від всього каркасу. При цьому появляються тріщини, які видні як з внутрішньої сторони, так і з зовнішньої. Поява полостей між шарами каркаса може мати як місцевий характер, так і по всьому колу. Причинами зазвичай є нагрів або перевантаження. Може відбуватися на здвоєних колесах, у яких велика різниця по тиску, або різні статичні радіуси. Пошкодження борта шини під впливом високої температури, отриманої від перегрітої ступиці колеса, під впливом іржі, під впливом пошкодженого борта шини, чи застосування обода невідповідного розміру. Пошкодження борта через закраїну обода під час перевантаження при русі на зниженому тиску.

Невідповідність тиску повітря, котре впливає на зношення та руйнування шин, особливо шин з металокордом в брекері. Навіть мало тривалий рух на спущених металокордних шинах призводить до їх руйнування. Також на руйнування впливає різниця по тиску у здвоєних задніх шин.

Вагове перевантаження шин призводить до збільшення теплоутворення в шині в плечовій зоні і зоні бігової поверхні шини. На каркасі руйнуються бокові стінки шини і з’являються розриви на боковині. Може бути викликане розшарування каркаса, відшарування протектора й боковин. Причиною може бути торкання кузова по поверхні шини. При різкому рушенню з місця, під час різкого гальмування, буксування є швидке зношення протектора шини, його нагрів та швидке руйнування. Переїзд через трамвайні колії, залізничні переїзди може викликати розриви бокових стінок каркаса.

Отже, визначено перелік пошкоджень, з якими подальша експлуатація шин не припустима, оскільки можливий раптовий не попереджувальний її вихід з експлуатації, що може призвести до дорожньо-транспортної пригоди.

6. Дослідження впливу дефектів в шині на її температурне поле

Для проведення експериментальних досліджень було підготовлено уніфікований для стендових і натурних випробувань комплект вимірювальної апаратури з використанням датчиків для вимірювання температур [4], розроблені методики проведення експериментальних досліджень серійних і експериментальних шин.

При визначенні впливу внутрішніх дефектів шини на її внутрішній температурний режим у період кочення використовували заздалегідь закладені дефекти розміром 5×5 мм. Ці штучні дефекти були подібністю експлуатаційних дефектів розшарування і призводили до підвищеного нагрівання шини в цій зоні, по відношенню до бездефектних зон [9]. При аналізі визначили, що в момент встановлення тимчасової рівноваги в бездефектних зонах температура в місці дефекту продовжувала збільшуватися. З раніше проведених досліджень, в результаті ви-

мірювання внутрішніх полів температур, встановлено, що через 9 хв. кочення температура у зоні дефекту шини перевищувала температуру інших (бездефектних) зонах на 4–10 °С. При визначенні впливу дефектів шини на поверхневий температурний режим користувалися переносним приладом часткового випромінювання «Пірометром 4П-01 “Смотрич”». Випробуванням підлягали серійні шини 10.00 R20 та 12.00 R20. Було встановлено, що перевищення поверхневої температури в зоні дефекту по відношенню до максимальної температури в подібних бездефектних зонах становило 10...15 °С [10]. Дослідження проводили відповідно правилу № 218-81 (ОСТ 38-04209-87). Випробування за цим правилом проводять згідно табл. 1.

Табл. 1. Стадії випробування автомобільних шин за правилом № 218-81

№ з/п	Ступінь випробувань	Швидкість, V, м/с	Навантаження на шину, Q, кН	Час обкатування, хв.
1	Попереднє	0,6 V_{max}	0,8 Q_{max}	240
2	Перше	0,6 V_{max}+10	Q_{max}	500
3	Друге	0,6 V_{max}+10	M_{anx}	500
4	Наступні	0,6 V_{max}+10	1,1 Q_{max}	500

При визначенні впливу дефектів шини на поверхневий температурний режим користувалися переносним приладом часткового випромінювання «Пірометром 4П-01 «Смотрич»». Навантажувальні параметри в шинах пожежних автоцистерн наведено в табл. 2, а місця вимірювання температури – на рис. 2.

Табл. 2. Навантажувальні параметри досліджуваних шин

№ з/п	Марка та модель шини	Внутрішній тиск, МПа	Швидкість кочення по барабану, м/с	Навантаження на шину, кН
1	10.00 R20 И-309	0,8	14	21,6
2	12.00 R20 И-150А	0,85	14	32,5

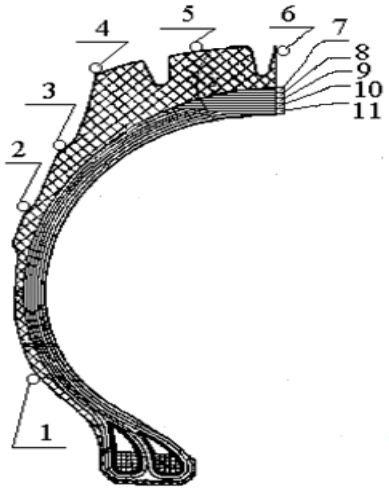


Рис. 2. Місця вимірювання температури у шинах пожежних автоцистерн: 1, 2, 3 – зверху боковини; 4 – зверху по краях протектора; 5 – зверху посередині протектора; 6 – зверху центром протектора; 7 – посередині зверху металокорду; 8 – посередині зверху каркаса; 9 – посередині на 3-му шарі каркаса; 10 – посередині на 2 шарі каркаса; 11 – посередині на 1-му шарі каркасу

Випробуванням підлягала серійна шина 10.00 R20 «1», що встановлюється на АЦ 40(130) 63Б, котра котилася по барабану шинообкатного стенда зі швидкістю 50 км/год, під навантаженням 1500 Н і з внутрішнім тиском 0,5 МПа, у якій є дефекти у зоні розшарування між брекером і протектором розміром 100×150 мм вздовж

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

осі симетрії. Під час вимірювання звертали основну увагу на різницю температур дефектної і бездефектної ділянок шини. Загальний нагрів склав 57–58 °С; У зоні дефекту 74 °С, а в навколишньому середовищі 21 °С. Під час вимірювання звертали основну увагу на різницю температур дефектної і бездефектної ділянок шини.

Вимірювання температур шини 12.00 R20, що обкатувалася на стенді з біговим барабаном зі швидкістю 90 км/год, навантаженням 2700 Н, внутрішнім тиском повітря 0,8 МПа, показало наступні результати (рис. 3, рис. 4) та (табл. 3).

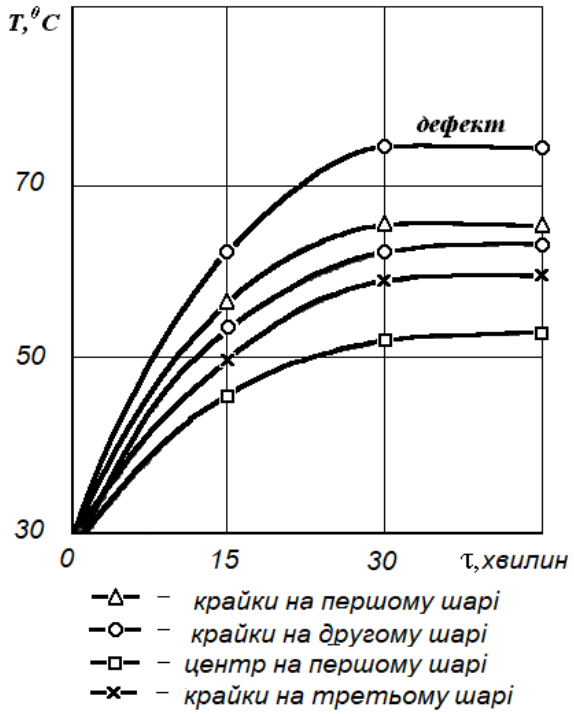


Рис. 3. Розподіл температур по шарам шини 10.00 R20

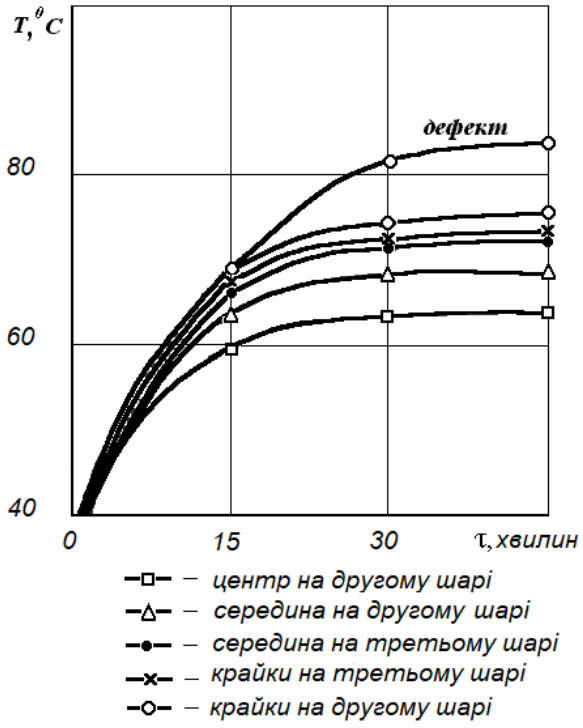


Рис. 4. Розподіл температур по шарам шини 12.00 R20

Табл. 3. Розподіл температури на поверхні шин

№ з/п	Марка шини	Час, хв.	Температура на поверхні шини, ^{0}С, в місцях виміру					
			Над бортом шини	В центрі боковини	Між боковиною протектора	По крайкам протектора	В середині протектора	В центрі протектора
1	10.00 R20 “1”	60	39	41	53	55	57	60
			Температура шини, °С, в зоні дефекту –74					
2	12.00R20 “1”	22	49	50	64	60	66	70
			Температура шини, °С, в зоні дефекту –80					

7. Розробка методики визначення прихованих дефектів шин пожежних автоцистерн

На безпеку руху пожежних автоцистерн безпосередньо впливають такі регульовані фактори як тривалість експлуатації шин, умови експлуатації шин та відсутність дефектів в них. Для визначення дефектів і технічного стану шини в експлуатації пропонується метод за поверхневими температурними полями, а саме інфрачервоний метод, який заснований на вимірюванні температурного поля поверхні шини.

Тепловий контроль можна здійснювати пасивним і активним методами. Пасивний метод передбачає використання власного випромінювання контрольованого об’єкта. Активний метод ґрунтується на попередньому нагріві і наступному випромінюванні температурного поля поверхні об’єкта. Різниця у температурі окремих зон характеризуватиме умови тепловідведення з них, а отже, наявність дефектів в ній.

Оскільки внутрішні процеси, що відбуваються в шині, відбиваються і на її поверхні, то за температурними змінами на поверхні шини можна будувати висновки про наявність в ній прихованих дефектів, а значить і про її технічний стан. Інфрачервоний метод дозволяє визначати експлуатаційні дефекти такі як, розшарування боковини шини та зони плеча, відшарування каркаса та протектора, а також виробничі такі як, порушення суцільності гумових деталей шини, утворення повітряних бульбашок усередині гумового масиву шини внаслідок поганого притискання роликами на складальному барабані каркаса до протектора [11]. Усі зазначені руйнування є внутрішніми дефектами шини, що ускладнює їх діагностику в процесі експлуатації. Наявність таких дефектів у шині під час руху транспортного засобу призводить до раптового, практично миттєвого, її руйнування.

Як тільки утворилося розшарування, відразу ж між шарами, що відшаровуються, виробляється тепло, яке сприяє поширенню відшаровування або в боковині, або в підпротекторному шарі.

Якісний процес діагностування технічного стану шин неможливий без попереднього діагностування частин та вузлів автомобіля, на якому вони встановлені. Тому діагностування технічного стану шин включає діагностику частин та вузлів автомобіля, що впливають на роботу шин.

Методика визначення прихованих дефектів у шині по поверхневим температурним полям складається з підготовки шин до випробувань, пошуку внутрішнього прихованого дефекту та обробки результатів.

При вимірюванні основних параметрів шин слід користуватися приладами, зазначеними в табл. 4.

Підготовка шин до випробувань:

1. шина повинна бути змонтована на відповідний обід;

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

2. шина повинна бути чистою від забруднення, сухою та мати температуру навколишнього середовища;

3. шина повинна мати відповідний тиск повітря;

4. шина повинна бути оглянута на предмет її цілостності та наявності включень (каміння, цвяхів, скоб і іншого проникаючого матеріалу). В разі неможливості швидкого вилучення сторонніх предметів, їх необхідно помітити на поверхні шини.

Табл. 4. Прилади і їх допустимі похибки при вимірюванні основних параметрів шин

№ з/п	Вимірювальний параметр	Прилад	Допустима похибка
1	Тиск повітря	Манометр класу точності 1.0	Не більше ±0,01 МПа
2	Габаритні розміри шини	Металева рулетка	Не більше 1 мм
3	Час кочення шини	Годинник	± 10 с
4	Геометричні розміри шини	Штангель-циркуль з подовженими губками	± 0,5 мм
5	Поверхнева тампература	Безконтактний прилад (пірометр) з діапазоном 30…100 ^{0}C	Не більше 2 %
6	Саморозігрівання шини	Випробувальний стенд з рухомими роликами (Ø 200 мм і більше) та з механізмом визна-чення навантаження на шину	Не більше 2 %
7	Швидкість кочення в діапазоні 30…60 км/год	-//-//-//-//-//-//-//-	± 5 %
8	Нормальне навантаження на шину	-//-//-//-//-//-//-//-	± 3 %

Пошук внутрішнього прихованого дефекту:

1. Встановити автомобіль для перевірки шин на випробувальний стенд та забезпечити його надійне кріплення.

2. Провести контроль тиску повітря та навантаження на шини, що перевіряються.

3. Відмітити на боковині шини вісім зон вимірювання.

4. Провести вимір температури на поверхні по колу з обох сторін шини.

5. Провести попередню обкатку шини при швидкості руху 5 км/год на протязі 5 хв. та здійснити вимір її температури, а результати виміру занести в протокол.

6. Провести обкатку шини при швидкості руху 30 км/год на протязі 10 хвилин, здійснити вимір її температури, а результати занести в протокол.

7. Провести обкатку шини при швидкості руху 60 км/год на протязі 20 хв та здійснити вимір її температури, а результати виміру занести в протокол.

8. Корегування тиску повітря в шині під час кочення не дозволяється.

Обробка результатів:

1. При отриманні даних про рівномірний розподіл температур на поверхні шини наводиться висновок, що шина придатна для подальшої експлуатації.

2. При отриманні даних про зони з підвищеною температурою (на 4–10 °С і вище) відносно її загальної температури наводиться висновок, що шина не придатна для подальшої експлуатації з причини наявності прихованого внутрішнього дефекту, на підставі якого шина повинна зніматися з використання.

3. Визначається місце з завищеною температурою на шині та визначається

характер дефекту. У разі прихованого внутрішнього дефекту виконується порівняння його розмірів з розмірами дефекту, який дозволяється з правилами експлуатації шини.

4. Робиться висновок про технічний стан автомобільної шини за результатами її візуального контролю та діагностування.

8. Обговорення результатів дослідження впливу дефектів на температурне поле шини

Отримані результати поверхневих температурних полів пояснюються тим, що внутрішні дефекти в шині випромінюють додаткове тепло, яке генерується розкриттям берегів тріщини (розшарування чи відшарування матеріалів шини). Даний факт фіксується на поверхні шини як зона з підвищеною на 4–10 °С температурою. Це явище чітко виражене підчас розігріву шини на барабанному стенді в плині 30 хв кочення, та залишається і потім, вже після стабілізації температурного поля шини – через 45–60 хв.

В роботі встановлено, що на стан шин пожежних автоцистерн безпосередньо впливають такі регульовані фактори, як саме стан шин (нерівномірна зношеність протектора та його порізи, подряпини боковини, стан бортового кільця), особливі умови експлуатації і наявність дефектів.

Встановлено, що через 45–60 хв кочення по барабанному стенду температура в шинах вантажних автомобілів стабілізувалася по всім вимірюваним зонам, окрім зони з дефектом. В зоні з дефектом температура продовжувала потроху зростати. Температура дефектної зони в шині 10.00 R20 досягла 75 °С, що перевищило температуру по крайках на першому шарі на 10 %, а в шині 12.00 R20 – досягла 85 °С, що перевищило температуру по крайках на другому шарі на 11 %. Характерно, що перевищення температури зовні над дефектною зоною теж було зафіксовано і склало в шині 10.00 R20 – 14 °С, а в шині 12.00 R20 – 10 °С.

Особливості запропонованої методики і отриманих результатів полягають в тому, що оцінка дійсного технічного стану шини може здійснюватись на відстані під час її котіння по біговому барабану, або відразу ж після зупинки автомобіля (після повернення в пожежну частину з навчання чи з пожежі), застосовуючи неруйнівний контроль її досліджуємих елементів. Позитивними добутками роботи є те, що досліджено вплив дефектів шин на їх експлуатаційну надійність. Також досліджена можливість пошуку дефектів в умовах пожежної частини і визначена періодичність проведення технічного обслуговування шин пожежних автоцистерн. Мінусами роботи є те, що експерименти проводилися на шинообкатному стенді з біговими барабанами Білоцерківського шинного заводу, а не в дорожніх умовах. Обмеженнями даної методики є те, що вона дійсна для шин лише вантажних автомобілів. Особливостями запропонованого методу визначення впливу дефектів шини на її стан є те, що за допомогою нескладних переносних вимірювачів температури – термометрів і пірометрів можливо визначати дійсний стан шини в умовах пожежної частини. Недоліком досліджень є те, що для детального діагностування шин необхідно застосовувати стенди з біговими барабанами, які є лише на базах аварійно-рятувальних загонів.

Для шин пожежних автоцистерн визначено необхідність проведення пошуку зовнішніх дефектів під час щоденного технічного обслуговування і пошуку внутрішніх дефектів під час технічного обслуговування № 1.

Подальший розвиток досліджень, із застосуванням критерію розвитку дефек-

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

ту до критичного розміру, дозволить визначати термін експлуатації дефектної шини до її руйнування на підставі вимірювань зовнішніх температурних полів.

Отримані дані дозволять своєчасно вилучити з експлуатації шини з критичними дефектами та збільшать надійність та безпеку руху пожежних автоцистерн під час слідування на виклик і виконання дій за призначенням.

9. Висновки

1. В роботі проаналізовано фактори, котрі значно обмежують пробіг шин пожежних автоцистерн. Вимірювання температури як на поверхні, так і всередині шини після обкатування шини на стенді з біговими барабанами показало, що найвища температура знаходиться на кромках брекера (в районі плечового пояса), поступово зменшуючись до середини протектора. Навантаження (в експерименті це сила притискання шини до бігового барабана), швидкість кочення шини по барабану та її внутрішній тиск – є основним фактором, що впливає на нагрівання шини. Визначено, що стабілізація температури в шинах пожежних автоцистерн встановлюється через 50–60 хв їх кочення по барабану стенда.

2. В роботі досліджено вплив дефектів в шині на її температурне поле. Експериментальними дослідженнями з визначення впливу внутрішніх дефектів, що утворюються в результаті злиття мікротріщин, поганої адгезії гуми з кордом, або через виробничий дефект на температурні поля шини встановлено, що у місцях передбачуваного дефекту було зафіксовано перевищення стосовно загального температурного стану шини і становило: через 80 хв кочення – 9 %; через 140 хв кочення 16 %, чим підвищує їх термонапружений стан. Ці дослідження дозволяють приймати рішення по контролю за температурним станом шини. Експериментальними дослідженнями з визначення впливу зовнішніх дефектів, котрі утворюються через порушення правил експлуатації шин, встановлено, що у інтервалі часу 15…50 хв з початку кочення шини зі швидкістю руху понад 30 м/с за її поверхневими температурними полями можна судити про наявність та величину дефектів. Перевищення температури у зоні дефекту, щодо інших зон, становило більше 5 %. Температурна стабілізація в шинах 10.00 R20 та 12.00R20 наступає через 50–60 хв їх кочення по біговому барабану за швидкості 50 км/год. При проведені дослідження за допомогою нескладних приладів (інфрачервоний пірометр, контактний термометр) з неруйнівного теплового контролю технічного стану шин пожежних автоцистерн, а саме виявлення внутрішніх розшарувань, пустот у товщі шини, дефектів виробництва дали підставу для наступних стверджень. Лише за допомогою теплового методу можливо ефективно та якісно визначити температурний стан шини, її цілісність.

3. Розроблено методику визначення прихованих дефектів шин пожежних автоцистерн. Запропонована методика визначення прихованих дефектів у шині по поверхневих температурних полях в умовах роботи державних пожежно-рятувальних частин не допустить експлуатації дефектної шини, чим саме підвищить безпеку руху пожежних аквтоцистерн. Перевірку шин слід проводити по поверненню з виїзду на пожежу або навчання, оскільки перед виїздом це неможливо. Експериментальними дослідженнями з визначення впливу дефектів шини на її термонапружений стан підтверджено перевищення температурного стану шини в зоні дефекту (як зовнішнього, так і внутрішнього) по відношенню до бездефектних зон в межах 4–10 °С, що дає можливість здійснювати контроль за шинами в умовах Державних пожежно-рятувальних частин за допомогою «Пірометт-

рів». Визначено, що над дефектною ділянкою шини завжди спостерігається підвищення температури, величина якого залежить від навантаження, характеру, розміру і глибини залягання дефекту.

Література

1. Behnke R., Kaliske M., Termo-mechanically coupled investigation of steady state rolling tires by numerical simulation and experiment. International journal of nonlinear mechanics. 2015. Vol. 68. P. 101–131. doi: 10.1016/j.:ijnonlinmec.2014.06.014

2. Integrated dynamics and efficiency optimizati on for EVs Vehicle dynamics international. 2019. P. 38–39. doi: 10.1002/asjc.1686

3. Pozhydayew S. Utochnennya ponyattya momentu syly u mekhanitsi [Clarification of the conceht of forse moment in mechanics] Avtoshlyakhovyk Ukrainy. I. 2018 P. 21–25. doi: 10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.21

5. Larin O., Vinogradov S., Kokhanenko V. Pat. 82321 Ukraine, IPC (2013.01) B60C 23/00. Adjustment for temperature adjustment in pneumatic tires / applicant and patent holder of the National University of Civil Society of Ukraine. № u201302439, application № 02/26/2013; publ. 07.25.2013, Bul. № 14.

6. Dong-Hyun Y., Beom-Seon J., Ki-Ho Y. Nonlinear finite element analysis of failure modes and ultimate strength of flexible pipes. Marine Structures. 2017. Vol. 54. P. 50–72. doi: 10.1016/j.marstruc.2017.03.007

7. Haseeb A., Jun T., Fazal M., Masjuki H. Degradation of physical properties of different elastomers upon exposure to palm biodiesel. Energy. 2011. Vol. 36. 3. P. 1814–1819. doi: 10.1016/j.energy.2010.12.023

8. Cho J., Yoon Y. Large deformation analysis of anisotropic rubber hose along cyclic path by homogenization and path interpolation methods. Journal of Mechanical Science and Technology. 2016. Vol. 30. 2. P.789–795. doi: 10.1007/s.12206–016–0134–5

9. Larin O. Probabilistic of fatigue damage accumulation in rubberlike materials. Strength of Materials. 2010. Vol. 47. 6. P. 849–858. doi: 10.1007/s11223–015–9722–3

10. Коханенко В. Б., Коломієць В. С. Вплив конструкції та стану шини на безпеку руху пожежних автоцистерн. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Вип. 37. С. 238–249. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-17

V. Kohanenko, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*
B. Kryvoshei, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

ANALYSIS OF CHARACTERISTIC DEFECTS OF FIRE TANKER TIRES AND METHODS OF THEIR DETERMINATION

In this article, the characteristic defects of tires that arise due to the specific modes of operation of emergency and rescue vehicles and fire trucks are defined, and a methodology for their determination in the conditions of the State fire and rescue units is developed. Today, the condition of tires is determined in research laboratories and with the help of special equipment. Tires operated by units of the State Fire and Rescue Service are not monitored. It has been established that most fire truck tires are in service longer than specified by the manufacturer, because they still have an unworn tread. Therefore, the internal condition of such tires is unreliable, with existing defects, with fatigue of the rubber material of the tire, which cannot be detected without special equipment. Circumstances related to the conduct of military operations lead to the movement of fire tankers on a damaged (as a result of enemy shelling) road surface, at increased speed and with weight overloads, which affects the temperature of tires. High temperature accelerates the growth of defects to critical dimensions and leads to the destruction of tires. Therefore, it is not enough to monitor their external condition, as tires accumulate internal tiring de-

© В. Б. Коханенко, Б. І. Кривошей

struction and manufacturing defects. As a result of the conducted research, it was established that the thermal radiation of the tire indicates the presence of internal destruction, which means that it makes it possible to determine its integrity. The paper solves the scientific and practical task of creating a methodology for determining hidden defects in a tire. The developed method of identifying hidden defects in the tires of fire trucks will allow determining their operational suitability. The research results obtained by me will increase the safety of following fire tankers to the place of call and during the performance of actions as assigned. These data are very important, as they reduce the probability of an unexpected sudden exit of fire truck tires from operation.

Keywords: fire truck, radial tire, thermal radiation, defects, reliability, stratification, safety

References

1. Behnke, R., Kaliske, M. (2015). Termo-mechanically coupled investigation of steady state rolling tires by numerical simulation and experiment. International journal of non-linear mechanics, 68, 101–131. doi: 10.1016/j.:ijnonlinmec.2014.06.014

2. Integrated dynamics and efficiency optimizati on for EVs Vehicle dynamics international. (2019), 38–39. doi: 10.1002/asjc.1686

3. Pozhydayew, S. (2018). Utochnennya ponyattya momentu syly u mekhanitsi [Clarification of the conceht of forse moment in mechanics] Avtoshlyakhovyk Ukrainy. I., 21–25. doi: 10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.21

5. Larin, O., Vinogradov, S., Kokhanenko, V. Pat. 82321 Ukraine, IPC (2013.01) B60C 23/00. Adjustment for temperature adjustment in pneumatic tires / applicant and patent holder of the National University of Civil Society of Ukraine. – № u201302439, application № 02/26/2013; publ. 07.25.2013, Bul. № 14.

6. Dong-Hyun, Y., Beom-Seon, J., Ki-Ho, Y. (2017). Nonlinear finite element analysis of failure modes and ultimate strength of flexible pipes. Marine Structures, 54, 50–72. doi: 10.1016/j.marstruc.2017.03.007

7. Haseeb, A., Jun, T., Fazal, M., Masjuki, H. (2011). Degradation of physical properties of different elastomers upon exposure to palm biodiesel. Energy, 36, 3, 1814–1819. doi: 10.1016/j.energy.2010.12.023

8. Cho, J., Yoon, Y. (2016). Large deformation analysis of anisotropic rubber hose along cyclic path by homogenization and path interpolation methods. Journal of Mechanical Science and Technology, 30, 2, 789–795. doi: 10.1007/s.12206–016–0134–5

9. Larin, O. (2015). Probabilistic of fatigue damage accumulation in rubberlike materials. Strength of Materials, 47, 6, 849–858. doi: 10.1007/s11223–015–9722–3

10. Kokhanenko, V. B., Kolomiets, V. S. (2023). The influence of the design and condition of the tire on the safety of the movement of fire tankers. Problems of emergency situations, Kharkiv. NUTSZU, 37, 238–249. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-17

Надійшла до редколегії: 05.03.2024
Прийнята до друку: 16.04.2024

УДК 514.18

Л. М. Куценко, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1554-8848)*
С. Ю. Руденко, *к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-5688-0639)*
А. Я. Калиновський, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)*
О. Г. Поліванов, *PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0002-6396-1680)*
О. І. Сухарькова, *викл. каф. (ORCID 0000-0003-1033-4728)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПНЕВМАТИЧНИХ ФАСОННИХ ПОВЕРХОНЬ ОБЕРТАННЯ, ЗМІЦНЕНИХ НАМОТКОЮ НИТКИ

Запропоновано схему наближеного розрахунку геометричних форм сім'ї меридіанів гумової пневматичної фасонної поверхні обертання залежно від функції зміни середньої кривини вздовж осі цієї поверхні. Одержану фасонну поверхню обертання передбачається зміцнювати намотуванням нитки у вздовж напрямів геодезичних кривих знайденої поверхні. В роботі наведено спосіб опису меридіанів поверхонь обертання шляхом розв'язання прямої і оберненої задач. Пояснено недоліки розв'язків прямої задачі, де одержуються незручні форми поверхонь для застосуванні у пневматичних виробах. Розв'язки оберненої задачі дозволяють одержати форми фасонних поверхонь обертання, коли зусилля спрямовані вздовж їх осей обертання. Розв'язок оберненої задачі одержано на базі застосування диференціальних рівнянь Фур'є. Також здійснено побудову фасонної поверхні обертання з намоткою по геодезичних з урахуванням кривини меридіана. В добавок наведено спосіб визначення геодезичної намотки на гофрований поверхні обертання з меридіаном пилкоподібної форми. Зазначено, що моделювання пневматичної поверхні доцільно здійснювати на основі обчислення її середньої кривини. Тому що значення середньої кривини поверхні розділу двох врівноважених фізичних середовищ буде пропорційне різниці значень тисків у цих середовищах. Варіюючи середню кривину поверхні, можна обирати величину тиску, яку витримає пневматичний виріб. Встановлено існування двох варіантів фасонних поверхонь обертання («жорстких» та «м'яких»). Перший варіант призначено для застосування в звичайних транспортних засобах з пневматичними подушками форми торів. Другий варіант орієнтовано на транспортні засоби спеціального призначення, де «м'якість» підвіски забезпечить проходимість по шляхам зі складним рельєфом. Для практики проведені дослідження корисні і важливі тому, що вони дозволяють будувати геодезичні лише на фрагментах фасонних поверхонь, які схильні до руйнування.

Ключові слова: меридіан обертання, середня кривина поверхні, гофрована поверхня обертання, армування намотуванням

1. Вступ

Оперативність допомоги населенню, яке постраждало в результаті аварій, суттєво залежить від наявності у рятувальників сучасного обладнання. Здебільшого рятувальникам доводиться вилучати постраждалих з понівечених автотранспортних засобів під час ДТП, евакуювати людей під час пожежі, рятувати під час повені, визволяти їх з-під уламків обваленого будинку. Аварійно-рятувальні служби також залучаються до ліквідації наслідків поривів трубопроводів, чим запобігають витоку різноманітних (у тому числі, і небезпечних) речовин.

Очевидно, що спектр обладнання, яке використовується під час аварійних робіт, досить широкий. Поряд з гідравлічним інструментом для проведення таких робіт широко застосовується пневматичне обладнання. Зазвичай, основу пневматичного обладнання складають надміцні (гумові) робочі поверхні [1], а саме: пневмоподушки, пневмодомкрати, пневмозаглушки, пневмобандажі тощо. При цьому, що важливо, фізичні властивості поверхонь робочих органів переліченого пневматичного обладнання суттєво залежить від їх геометричних форм [2].

Сучасні комп'ютерні технології дозволяють досліджувати вплив

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

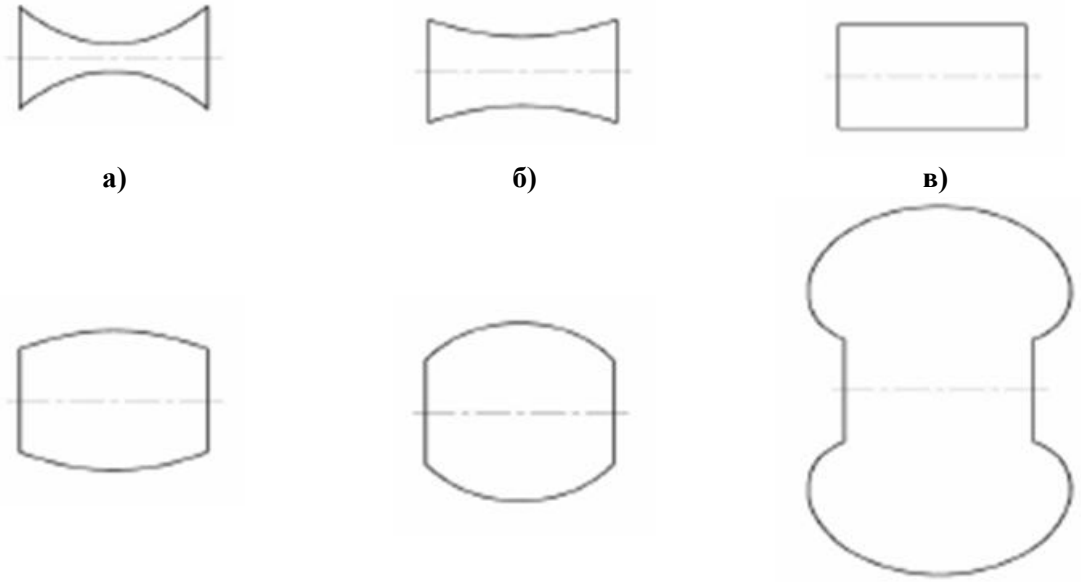
геометричної форми поверхонь на їх фізичні властивості. Тому доцільними будуть дослідження, спрямовані на виявлення причино-наслідкового зв'язку геометричних форм поверхонь з їх фізичними властивостями. В даній роботі увагу приділено поверхням, для яких характерною є їх стала (тобто незмінна за значенням в часі) середня кривина. Якщо такі поверхні використати в конструкціях пневматичного обладнання, то всі ділянки виявляться рівно напруженими – тобто рівно ймовірними щодо їх руйнування. Нагадаємо, що середня кривина поверхні визначається півсумою мінімальної й максимальної кривин ліній перетину поверхні із взаємно перпендикулярними площинами, що проходять через нормаль у даній точці поверхні [3]. Фізична інтерпретація середньої кривини полягає у наступному. Нехай поверхня Г є межею двох середовищ і знаходиться в рівновазі. Нехай p_1 і p_2 — тиски, які утворюють на поверхню Г перше та друге середовище відповідно, λ — поверхневий натяг Г. В результаті, поверхня, що знаходиться в рівновазі та є межею двох середовищ, має сталу середню кривину $H = \frac{1}{\lambda}(p_2 - p_1)$.

Такі унікальні властивості поверхонь сталої середньої кривини доцільно використовувати при конструюванні робочих поверхонь пневматичних виробів (гумових підйомників або амортизаторів). Згадана властивість поверхонь сталої середньої кривини базується на фундаментальній теоремі Пуассона-Лапласа, згідно з якою середня кривина поверхні розділу двох врівноважених фізичних середовищ пропорційна різниці значень тисків у їх суміжних порожнинах. Отже, варіюючи середньою кривиною поверхні, можна обирати величину тиску, яку витримає дана конструкція пневматичного виробу. Зазначимо, що рівняння Лапласа і Пуассона в курсі математичної фізики описують потоки ідеальних рідин в стаціонарних потоках, а також стаціонарний розподіл напруженості фізичних полів [4]. При цьому, рівняння Лапласа описує зазначені процеси за умови відсутності внутрішніх джерел енергії (чи відтоків).

Досліджувати зміну середньої сталої кривини поверхні обертання зручно на прикладі зміни геометричної форми мильної плівки [5]. Для прикладу розглянемо два кільцевих контури, жорстко закріплених один навпроти одного в паралельних площинах (рис. 1, а). «Натягнемо» на контури мильну плівку. Спочатку вважатимемо, що поверхня із торців є відкритою – тобто тиск зовні і всередині поверхні однаковий. Такою поверхнею буде катеноїд (рис. 1, а), як поверхня нульової середньої кривини (або мінімальною поверхнею). Далі вважатимемо, що поверхня із торців герметично закрита. Будемо поступово «накачувати» повітря всередину одержаної ємності. В результаті поверхня трансформується, проходячи через певні проміжні положення (рис. 1, б – рис. 1, е). При цьому її середня кривина зростатиме по мірі збільшення тиску всередині одержаної ємності.

В просторовому випадку згадані поверхні обертання сталої середньої кривини мають вигляд [6], наведений на рис. 2.

Наведений приклад ілюструє той факт, що поверхня з більшою середньою кривиною теоретично має витримати більший тиск. Хоча таке збільшення тиску завжди обмежене механічними властивостями міцності матеріалу, з якого виготовлена пневматична поверхня обертання. Але наведені «класичні» поверхні сталої середньої кривини мають форми, не завжди зручні для конструювання пневматичних виробів. У більшості випадків зазначеним виробам на практиці бажано надати форму фасонних (у частковому випадку – гофрованих) поверхонь обертання, де зусилля спрямовані вздовж їх осей обертання.



а) **б)** **в)**

г) **д)** **е)**

Рис. 1. Форми поверхонь обертання сталої середньої кривини, які розподіляють об'єми середовища на дві частини: а – катеноїд; б – ундулоїд; в – циліндр; г – ундулоїд; д – сфера; е – нодоїд

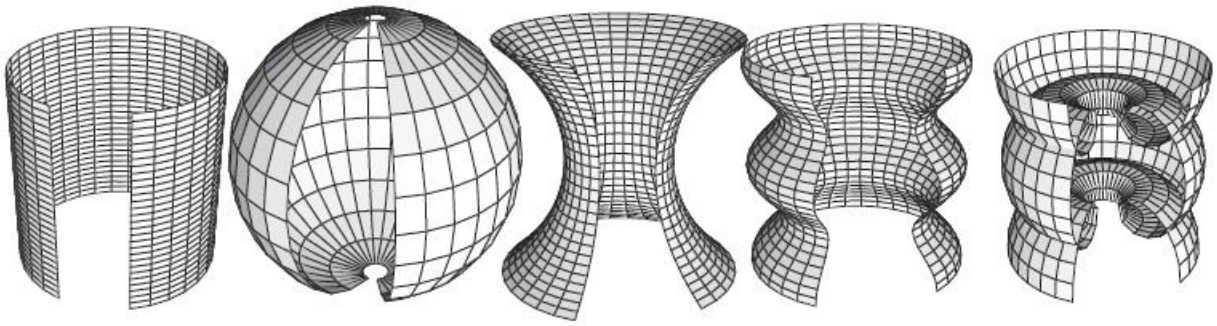


Рис. 2. Вигляд поверхонь обертання сталої середньої кривини (зліва направо): циліндр, сфера, катеноїд, ундулоїд і нодоїд

Тому більш прийнятними для конструкцій пневматичних пристроїв будуть поверхні обертання, середня кривина яких змінюється вздовж їх осей за наперед заданим законом. Звідси постає задача визначити приклади фасонних поверхонь обертання, у якої середня кривина змінюється вздовж осі згідно наперед заданого закону. І які реально можна використати на практиці. Крім того, для функціонування виробу в умовах його навантаження зусиллями вздовж осі, поверхню виробу необхідно зміцнити (армувати) шляхом намотування нитки, виготовлену, наприклад, з кевлару. Для цього необхідно описати множину геодезичних кривих на фасонній поверхні обертання як геометричну модель намотки нитки.

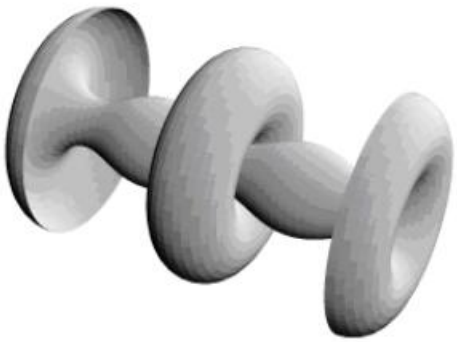
В даній роботі наукову проблему складає сукупність діалектично складних практичних питань, пов'язаних з визначенням відповідності між геометричною формою і міцністю пневматичних гумових поверхонь (виробів). Обране у якості основи досліджень геометричне поняття середньої кривини поверхні має доповнити існуючи знання або прикладні методи у науці і потребує додаткових подальших досліджень. Таким чином, буде актуальною проблема розрахунку фасонних поверхонь обертання зі змінною за певним законом вздовж осі обертання середньою кривиною з урахуванням зміцнення цих поверхонь шляхом геодезичного намотування.

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

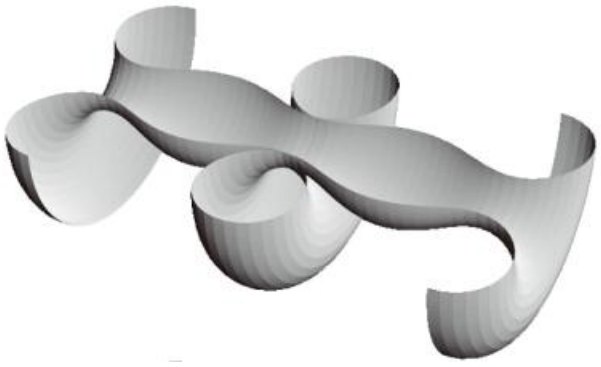
Стаття присвячена геометричному моделюванню пневматичних поверхонь і геодезичних кривих на них. Тому далі присвятимо огляд літератури спорідненим способам «конструювання» пневматичних поверхонь (обертання) шляхом визначення значень середніх кривин цих поверхонь. Крім того, наведемо можливі впровадження пневматичних поверхонь.

У роботі [7] показано, що у поверхні обертання сталої середньої кривини меридіаном буде траєкторія першого фокуса еліпса, утворена при його коченні по осі обертання. В результаті одержимо криву під назвою ундулоїд. Другим можливим меридіаном буде траєкторія другого фокуса, утворена гіперболою при її коченні по осі обертання. В результаті одержимо другу криву під назвою нодоїд. Недолік такого графічного підходу до профілювання меридіанів полягає у необхідності додаткового обчислення функції зміни середньої кривин. Робота [8] присвячена опису та побудові поверхонь обертання, у яких середня кривина змінюється вздовж осі обертання за неперервною періодичною функцією H(s) з періодом L. Доведено, що функція H(s) буде описом середньої кривини періодичної поверхні обертання S з періодом L тоді, і лише тоді, коли вона задовольнятиме умовам: $\frac{\int \cos\eta(u)du}{\sin\eta(L)} = \frac{\int \sin\eta(u)du}{1-\cos\eta(L)}$; де $\eta(u) = 2\int H(s)ds$. На рис. 3 та рис. 4 наведено прилад поверхні обертання, у якої H(s)=1,2 cos(s). До недоліків такого підходу слід віднести його обмеженість стосовно використання негладких функцій у описі H(s) .



а)

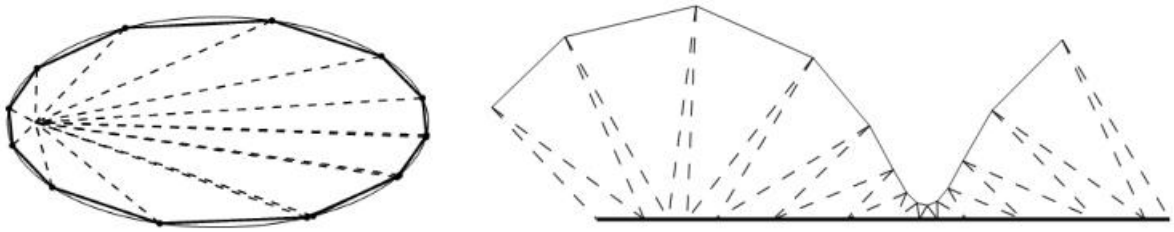
Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхні, у якої закон зміни середньої кривини H=1,2 cos(s)



б)

Рис. 4. Розрізана вздовж осі поверхня, у якої закон зміни середньої кривини H=1,2 cos(s)

Робота [9] присвячена конструюванню граної поверхні (умовно) сталої середньої кривини, яка буде дискретним аналогом поверхні обертання. Поверхня утворюється шляхом побудови в еліптичній області траєкторій математичного більярда. Для цього необхідно змоделювати математичний більярд в еліпсі (рис. 5, а), потім з'єднати точки на еліпсі з фокусом, і нарешті «розгорнути» одержані трикутники у пряму осі обертання зі збереженням форми трикутників (рис. 5, б). На завершення необхідно «дискретно» (з кроком по куту) обертати твірну ломану навколо цієї обраної осі. В результаті має утворитися грана поверхня сталої середньої кривини. До недоліків такого підходу слід віднести складність аналітичних операцій для його реалізації. Ці операції слід підкріпити програмними продуктами.



а) **б)**

Рис. 5. Математичний більярд в еліпсі: а – більярд в еліпсі; б – «розгортка» більярду в еліпсі як твірна поверхні обертання

В роботі [10] досліджуються поверхні, які допускають конформну параметризацію лінії кривини ізотермічні поверхні. Розглянуто перетворення Дарбу ізотермічних поверхонь, які підкоряються принципу перестановлюваності: для двох різних спектральних параметрів відповідні перетворення мають загальне перетворення, яке можна обчислити алгебраїчно. До недоліків слід віднести складність конформної параметризації лінії кривини поверхні. В роботі [11] наведено дослідження ергономічних пневматичних матраців у стосовно впливу його форми на вирівнювання хребта. Була розроблена нова пневматична пружина змінної жорсткості та проведені експерименти для аналізу його механічних властивостей і факторів впливу. Початкову жорсткість, об'єм і монтажну висоту можна передбачити за допомогою геометричних параметрів і початкового внутрішнього тиску. Але в роботі відсутнє програмне забезпечення діалогу для знаходження параметрів пристрою. В роботі [12] надано чисельне рішення для характеристики деформації пневморесори сильфонного типу для автомобільної підвіски. Структура оболонки моделюється як практично нерозтяжна мембрана, яка не має жорсткості на вигин. На структуру впливає тільки пневматично-пружна деформація за рахунок стисливості повітря під тиском. Для перевірки виконується кінцево-елементне моделювання пристрою стосовно чутливості сильфонів пневматичної підвіски до динамічних навантажень. До недоліків слід віднести не чітке формулювання причино-наслідкових параметрів деформації пневморесори сильфонного типу. В роботі [13] наведено метод побудови апроксимації трикутної сітки до поверхні постійної середньої кривизни шляхом мінімізації дискретизованої площі поверхні з фіксованим об'ємом та фіксованими граничними кривими. Ключова ідея полягає в процедурі оптимізації, де функціонал площі поверхні замінюється функціоналом енергії за методом найменших квадратів. Об'єм, визначений користувачем, вважається параметром керування формою, і оскільки обмеження об'єму не обов'язково точно задовольняти, то його розглядають як додаткове рівняння в системі найменших квадратів. Але в роботі відсутні необхідні оцінки точності обчислень площі поверхні. В роботі [14] досліджуються штучні пневматичні м'язи, які були винайдені для ортопедії. М'язи складаються з надувної камери (пузиря) всередині плетеної сітки. Коли внутрішній міхур відчуває тиск і розширюється, геометрична сітка утворює радіальне розширення в лінійному зрізі. Досліджується вибір кута плетення, який утворюється між поздовжньою віссю сітки та волокнами сітки. До недоліків слід віднести відсутність порівнянь варіантів геометричних форм надувної камери (пузиря) та плетеної сітки. В роботі [15] Розроблено пневматичні захвати (штучні кінцівки) для роботів. Захвати Dexterous є ефективними, але надто коштовні, вони недостатньо міцні для промислової експлуатації. Досліджуються принципи м'якої робототехніки та дизайн недорогих захватів, здатних захоплювати широкий діапазон об'єктів без пот-

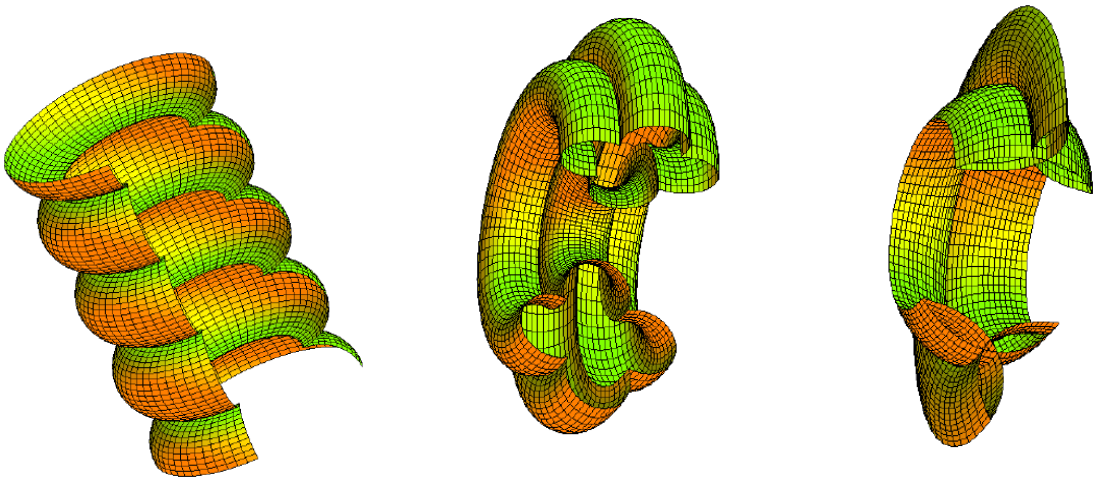
 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

реби у складних схемах управління. М'яка природа пневматичних захватів робить їх кращими для роботи з крихкими та делікатними предметами, ніж традиційні жорсткі захвати. Але в роботі відсутній аналіз конструкцій пневматичних захватів для роботів. Робота [16] присвячена темі енергозбереження для промислових пневматичних систем приводу шляхом повторного використання відпрацьованого повітря на основі еластичного накопичувача постійного тиску. Використовуючи гіперпружні механічні властивості гуми створено накопичувач енергії постійного тиску. Для перевірки ефективності енергозбереження використано побудовано випробувальний стенд. Де з'ясовано, що ефективність енергозбереження становить 54,1 % за заданих умов роботи. До недоліків слід віднести відсутність аналізу можливих геометричних форм еластичного накопичувача.

У роботі [17] вивчаються різновиди поверхонь обертання з постійним значенням середньої кривини. Це так звані як поверхні Делоне. А також поверхні обертання Вілмора. Наведено декілька фізичних моделей поверхонь Делоне, які є недулоїдними поверхнями. Досліджено поверхні обертання Вілмора, які мають багато застосувань у реальному світі, наприклад, у галузі еластичних біологічних мембран. До недоліків слід віднести відсутність графічних зображень недулоїдних поверхонь. У роботі [18] наведено графічне представлення деяких поверхонь постійної середньої кривини. Цікаві форми та складні структури таких поверхонь отримані з використанням комп'ютерної програми Mathematica. До недоліків слід віднести несистемну параметризацію поверхонь. У роботі [19] досліджено пневматичний штучний м'яз у формі тонкого волокна, який може генерувати скорочувальні рухи при симуляції. Пристрій заснований на технології пневматичного накачування газу і складається з еластомірного міхура, який обгорнутий плетеною втулкою. Плетіння скорочується і передає радіально розширення в поздовжнє звуження через зміну кута обплетення рукава в результаті накачування повітря. Досліджено жорсткість нитки, діаметр нитки, діаметр міхура та твердість міхура. Результати цінні для проектування та розробки волоконних пневматичних приводів. До недоліків слід віднести недостатнє пояснення кінематики скорочувальних рухів при симуляції пневматичного штучного м'язу. У роботі [20] представлено метод моделювання дискретних поверхонь постійної середньої кривизни, які часто виникають у природі і затребувані в архітектурі та інших інженерних впровадженнях. Метод здатний моделювання зазначені поверхні з фіксованими або вільними межами і є надійним щодо якості вхідної сітки та змін топології. До недоліків слід віднести відсутність відповідного програмного забезпечення. У роботі [21] розглянуто трикутні апроксимації Безьє до поверхонь постійної середньої кривини. Надано метод генерації поліноміальних наближень поверхні постійної середньої кривини із заданою межею. Як недолік слід відзначити відсутність прикладів поліноміальних наближень поверхні постійної середньої кривини. У роботі [22] досліджено питання впливу геометрії штучного сечового міхура на пневматичні штучні м'язи. Представлено модельні та експериментальні дані щодо властивостей активації штучних м'язів сумісно із змінним попереднім натягом сечового міхура та товщиною стінки. До недоліків слід віднести відсутність досліджень залежності геометрії штучного сечового міхура від форми пневматичних штучних м'язів.

В Україні дослідженням властивостей середніх кривин поверхонь та реалізації їх на практиці, присвячені роботи професора Пилипаки С. Ф. та його учнів. В роботі [23] наведено опис класу поверхонь (обертання), у яких середня кривина меридіана за значеннями буде близькою до сталої величини. Якщо кривина мери-

діана змінюється за законом $H = \frac{d + 2r\cos u}{2r(d + r\cos u)}$, то поверхня складатиметься із системи співвісних ділянок. Тут u – параметр, r – радіус дуги твірної тора, d – відстань від центра кола дуги до осі обертання поверхні в цілому. Отже, зазначена формула з параметрами d і r дозволяє визначити сім'ю поверхонь з «майже» нульовими середніми кривинами. В роботі [24] унаочнюється клас узагальнених поверхонь обертання (рис. 6), у яких значення H(u) середньої кривини вздовж осі залишаться близькими до нуля. Розглянуті поверхні можуть скласти основу нових конструкцій пневматичного обладнання.



а) **б)** **в)**

Рис. 6 Узагальнені поверхні обертання, де кривина меридіана змінюється за законом $H = \frac{d + 2r\cos u}{2r(d + r\cos u)}$**; а – r=1, d=7; б – r=1,5, d=5; в – r=0,8, d=9**

Проведений огляд відомих результатів стосовно визначення поверхонь зі змінної вздовж осі середньою кривиною показав відсутність інженерних підходів до опису та побудови відповідних поверхонь обертання із зазначеними властивостями. Проведений мета-аналіз вказує на відсутність результатів стосовно алгоритмічної реалізації побудови пневматичних поверхонь. У явному вигляді відсутні графічні побудови, призначені для зміцнення одержаних поверхонь.

Таким чином, ще не вирішеною частиною проблеми розрахунків пневматичного спорядження є розвиток обчислень на базі поняття середньої кривини поверхонь, а також визначення розташування геодезичних ліній на зазначених поверхнях. Запропонована стаття базуються на результатах робіт авторів [25, 26], одержаних в Національному університеті цивільного захисту України (м. Харків). В наданій роботі удосконалено алгоритмічні складові розрахунку геометричної форми сім'ї меридіанів гумової пневматичної фасонної поверхні обертання залежно від функції зміни середньої кривини вздовж осі цієї поверхні, а також проілюстровано розташування на фасонній поверхні геодезичних ліній.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка способу визначення форм меридіанів фасонних поверхонь обертання, у яких середня кривина змінюється вздовж осі за наперед заданим законом. Для зміцнення одержаних поверхонь необхідно розрахувати траєкторії намотування нитки по геодезичним кривим цих поверхонь.

© Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– описати меридіани поверхонь обертання шляхом розв'язання прямої і оберненої задач;

– побудувати фасону поверхню обертання з намоткою по геодезичним з урахуванням кривини меридіана;

– визначити геодезичну намотку на гофрований поверхні на випадок меридіана пилкоподібної форми.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом досліджень є розвиток технології розрахунку пневматичного обладнання для аварійно-рятувальних служб у вигляді фасонних поверхонь обертання, виготовлених з надміцної гумової плівки. З метою зміцнення робочої частини обладнання здійснюється її зміцнення (армування) шляхом намотуванням кевларової нитки. Тобто в роботі розглядається геометричне моделювання гумових фасонних поверхонь обертання та їх зміцнення намотуванням нитки по геодезичних лініях цих поверхонь.

Предметом досліджень є розробка способу розрахунку геометричних форм меридіанів фасонних поверхонь обертання залежно від функції зміни середньої кривини вздовж осі, та поєднання його з методикою геодезичної намотки ниткою.

Гіпотеза досліджень пов'язана з особливостями поверхонь сталої середньої кривини. Їх характерні відмінності базуються на фундаментальній теоремі Пуассона-Лапласа, згідно з якою середня кривина поверхні розділу двох врівноважених фізичних середовищ пропорційна різниці значень тисків у цих середовищах. Отже, варіюючи середню кривину поверхні, можна обирати величину тиску, яку витримає пневматичний виріб. Побудову геодезичної намотки ниткою на гофрований поверхні узагальнено на випадок меридіана пилкоподібної форми.

Значення досліджень для практики полягає у забезпеченні раціонального розрахунку пневматичних виробів (підйомників, ресор, амортизаторів, тощо), призначених для застосування при виконанні аварійно-рятувальних робіт. В даній роботі проведено розрахунок пневматичного обладнання на основі існуючого феномену середньої кривини пневматичних поверхонь. А саме таких, для яких характерною є їх стала (тобто незмінна за значенням в часі) середня кривина. Якщо такі поверхні використати в конструкціях пневматичного обладнання, то всі ділянки виявляться однаково напруженими – тобто рівно ймовірними щодо їх руйнування. Ці унікальні властивості поверхонь сталої середньої кривини пропонується використовувати при конструюванні робочих поверхонь пневматичних виробів (гумових підйомників або амортизаторів). Крім цього в даній роботі в якості математичного апарату досліджень обрано натуральні рівняння кривих. В якості програмного забезпечення використовується математичний процесор Maple, здатний оперувати з описами геометричних об'єктів на рівні аналітичних виразів.

5. Визначення форм меридіанів фасонних поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки

5.1. Опис меридіанів поверхонь обертання шляхом розв'язання прямої і оберненої задач

Постановка прямої задачі профілювання поверхні обертання змінної середньої кривини полягає у такому. Нехай за допомогою двох функцій f(u) і g(u) задано поверхню обертання, описану рівнянням:

$$S(u,v)=\{g(u),f(u)\cos v,f(u)\sin v\}. \quad (1)$$

Відомо [3], що середня кривина вздовж осі цієї поверхні визначається за допомогою співвідношення:

$$H(f,g)=\frac{1}{2}\left(\frac{g'}{f'\sqrt{f'^2+g'^2}}+\frac{f'g''-f''g'}{\left(f'^2+g'^2\right)^{3/2}}\right). \quad (2)$$

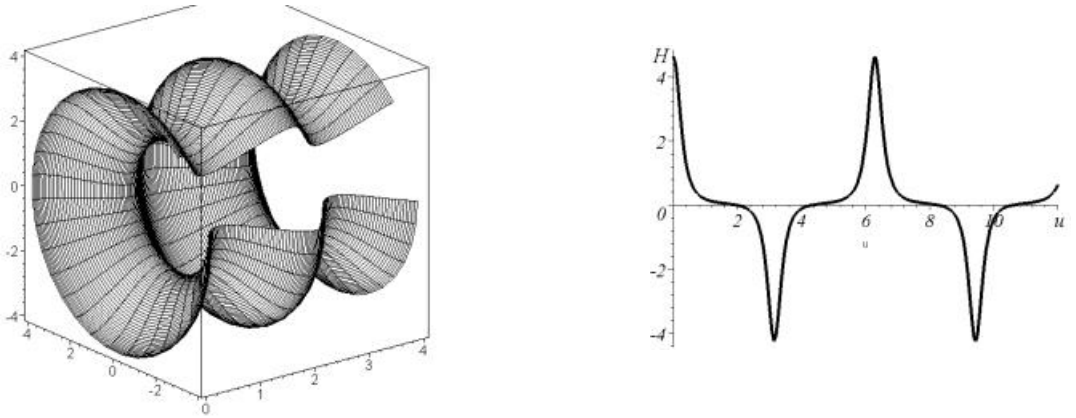
Необхідно побудувати фасонну поверхню обертання зі змінною уздовж осі кривиною її меридіана залежно від функцій $f(u)$ і $g(u)$.

Для пояснення розглянемо ряд прикладів.

Приклад 1. Нехай $f(u)=5+\cos u$ і $g(u)=u/3$. Середня кривина вздовж осі поверхні обертання обчислювалася за формулою (2):

$$H=\frac{1}{2}\frac{\sqrt{10-9\cos^2 u}\,(10+27\cos u)}{300-540\cos^2 u+243\cos^4 u+100\cos u-180\cos^3 u+81\cos^5 u}. \quad (3)$$

На рис. 7 зображено шукану поверхню обертання (тут і далі з умовним вирізом) та графік зміни середньої кривини вздовж її осі.



а) **б)**

Рис. 7. Шукана поверхня обертання: а – зображення шуканої поверхні; б – графік зміни середньої кривини вздовж осі поверхні

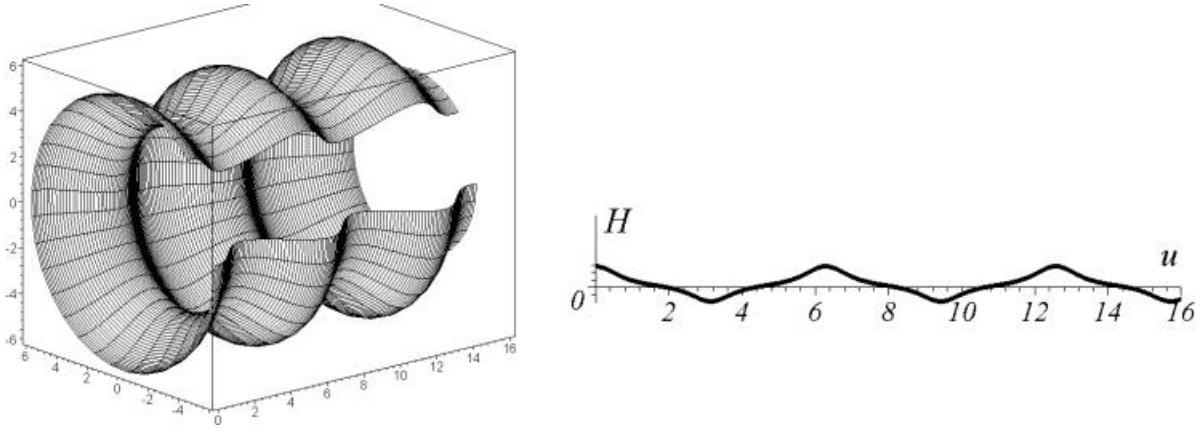
На рис. 7 спостерігаємо велику амплітуду значень графіка зміни середньої кривини вздовж осі поверхні.

Приклад 2. Нехай $f(u)=5+\cos u$ і $g(u)=u$. Середня кривина поверхні вздовж її осі обчислюється за формулою:

$$H=-\frac{1}{2}\frac{2+5\cos u}{(5+\cos u)(-2\cos^2 u)\sqrt{2-\cos^2 u}}. \quad (4)$$

На рис. 8 зображено шукану поверхню обертання та графік зміни середньої кривини вздовж її осі.

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.



а) **б)**

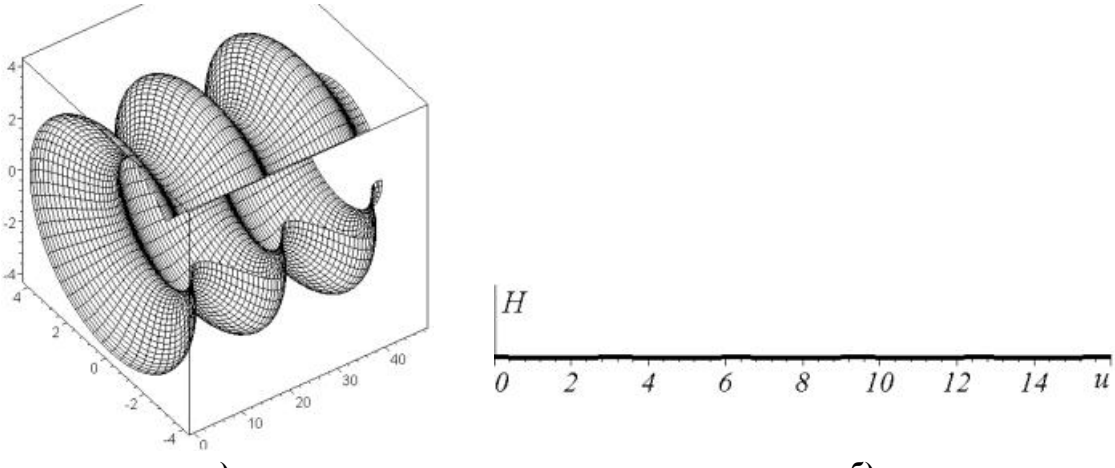
Рис. 8. Шукана поверхня обертання: а – зображення шуканої поверхні; б – графік зміни середньої кривини вздовж її осі

На рис. 8 спостерігаємо незначну амплітуду значень графіка зміни середньої кривини вздовж осі поверхні.

Приклад 3. Нехай $f(u) = \pi + \cos u$ і $g(u) = 3u$. Середня кривина вздовж осі поверхні обчислювалася за формулою:

$$H = -\frac{3}{2}\frac{10 + \pi\cos u}{(\pi + \cos u)(-10 + \cos^2 u)\sqrt{10 - \cos^2 u}}. \quad (5)$$

На рис. 9 зображено шукану поверхню обертання та графік зміни середньої кривини вздовж її осі.



а) **б)**

Рис. 9. Шукана поверхня обертання: а – зображення шуканої поверхні; б – графік зміни середньої кривини вздовж осі поверхні

На рис. 9 спостерігаємо практично постійні значення графіка зміни середньої кривини вздовж осі поверхні.

Отже, розв'язання прямої задачі зводиться до підбору (гладких) функцій f(u) і g(u) за критерієм, який погано формалізується. А саме: необхідно цим підбором забезпечити «фасонність» поверхні обертання, зручної для застосування у пневматичних виробах.

Особливість досліджень полягає у тому, що візуально практично не можливо

відрізнити геометричні форми поверхонь, наведених вище на рис. 7 – рис. 9. Але, при цьому, графіки зміни середньої кривини вздовж осі поверхні можуть суттєво відрізнятися. До того ж амплітуда графіка зміни середньої кривини вздовж осі поверхні має бути без «пікових» сплесків, які негативно впливатимуть на функціонування пневматичного виробу в цілому. Отже, наочні зображення одержаних поверхонь різні – але подібні за виглядом «вигинів», що ускладнює обирання прийнятного для експлуатації варіанту.

Тому на відміну від прямої задачі для практичних реалізацій слід розробити спосіб розв'язання оберненої задачі – тобто визначення меридіана поверхні обертання, зручної для експлуатації на практиці. А саме, необхідно за заданою функцією зміни вздовж осі середньої кривини поверхні обертання визначити опис (тобто рівняння) меридіана.

Далі для розв'язання оберненої задачі розглянемо питання параметризації кривої лінії за допомогою натурального параметра. Натуральні рівняння зручно використовувати при певних розрахунках опису та зображень кривих. Такі рівняння описують кривину кривої залежно від її натурального параметра *s*. Цей параметр визначає довжину даної кривої, починаючи з її деякої «нульової» точки. Натуральне рівняння кривої має вигляд:

$$\frac{1}{R} = f(s), \tag{6}$$

де R – радіус кола, дотичного до (гладкої) кривої в певній її точці, а функція f(s) визначає закон зміни кривини лінії (тобто величини k=1/R) залежно від натурального параметра s. За визначенням класичною кривиною дуги кривої у точці M називається величина:

$$k = \lim_{\Delta S \to 0} \left| \frac{\Delta \alpha}{\Delta s} \right|, \tag{7}$$

де λ – кут між дотичними в точках M і M_{Δ}, а Δ s – довжина дуги MM_{Δ}. З використанням похідної формулу (7) можна записати як

$$k = |\dot{\alpha}|, \tag{8}$$

де $\alpha(s)$ – кут повороту дотичної у точці M, що залежить від шляху, пройденого по кривій, $\dot{\alpha}$ – похідна функції $\alpha(s)$ по параметру *s*.

Рівняння (8) допомагає описати криву, що задана натуральним рівнянням. Дійсно, з рівняння $k = \dot{\alpha}(s) = f(s)$ визначається функція:

$$\alpha(s) = \int_0^s f(s)ds + \alpha_0, \tag{9}$$

За допомогою функції (9) обчислюється кут нахилу дотичної залежно від довжини дуги. Тоді відповідно до відомих залежностей маємо тотожності:

$$\frac{dx}{ds} = \cos\alpha \text{ і } \frac{dy}{ds} = \sin\alpha. \tag{10}$$

І параметризацію кривої можна задати у вигляді:

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

$$x(s) = \int_0^s \cos\alpha(s)ds + x_0 \; ; \; y(s) = \int_0^s \sin\alpha(s)ds + y_0 \, , \qquad (11)$$

або, з урахуванням виразу (9), рівняння шуканої кривої матиме вигляд:

$$x(s) = \int_0^s \cos\left(\int_0^s f(s)ds + \alpha_0\right)ds + x_0 \; ; \; y(s) = \int_0^s \sin\left(\int_0^s f(s)ds + \alpha_0\right)ds + y_0 \, , \qquad (12)$$

Легко переконатися в тому, що обертання кривої спричиняє зміну у формулах (12) постійної α_0, а паралельний перенос кривої пов'язаний зі зміною параметрів x_0 і y_0. Рівність цих констант нулю визначає розташування кривої так, що початкова точка для відліку дуги буде розташована на початку координат, а додатний напрямок дотичної у ній збігається з додатним напрямком осі Ox.

Для побудови кривих доцільно застосовувати складену maple-програму (рис. 10). Тут через **kap** позначено значення кривини кривої; через **a** і **b** – межі зміни параметра довжини дуги; систему диференціальних рівнянь Френе позначено через **sys**; розв'язок цієї системи позначено через **ans**, а підготовлену для візуалізації інформацію позначено, як **pic**.

```
profil := proc(kap, a, b)
local sys, p, ics, p1:
sys:= diff(alpha(s),s) = kap(s)^w,
 diff(x(s),s) = cos(alpha(s)),
 diff(y(s),s) = sin(alpha(s)):
krai:= x(0)=0,y(0)=0, alpha(0)=0;
ans:=dsolve({sys,krai},{x(s),y(s),alpha(s)},
    type=numeric);
pic:=odeplot(ans,[x(s),y(s)], s=a..b,
  numpoints=12000,thickness=2,color=black):
        display(pic,scaling=constrained);
 end:
```

Рис. 10. Фрагмент програми для побудови кривих за їх кривинами

Звертатися до процедури-функції, що на рис. 10, треба так (як приклад):

kap := s -> 1 + 5*cos(s)^2; profil(kap, 0, 6*Pi);

У результаті в системі декартових координат {x, y} буде знайдено опис меридіану поверхні обертання, що відповідатиме натуральному параметру s кривини **kap** кривої.

Далі розглянемо опис меридіану поверхні обертання з використанням системи диференціальних рівнянь Френе. Нехай кривина вздовж осі поверхні обертання змінюється за законом $k(s)$. Тоді кут між дотичною і віссю Ox можна обчислити за допомогою виразу $\theta = \int_0^t k(s)ds$. Система диференціальних рівнянь Френе має вигляд:

$$\frac{d}{dt}x(t) = \cos\left(\int_0^t k(s)ds\right);\ \frac{d}{dt}y(t) = \sin\left(\int_0^t k(s)ds\right). \tag{13}$$

Розв'язання системи (13) матиме вигляд:

$$x(t) = \int \cos\left(\int_0^t k(s)ds\right)dt;\ y(t) = \int \sin\left(\int_0^t k(s)ds\right)dt. \tag{14}$$

Але інтеграли у виразах (14) точно не обчислюються, тому на практиці для побудови кривої буде застосовано метод розкладення підінтегральних функцій у ряд Фур'є.

Для підінтегральних функцій:

$$f_x(s) = \cos\left(\int_0^t k(s)ds\right) \text{ або } f_y(s) = \sin\left(\int_0^t k(s)ds\right) \tag{15}$$

ряд Фур'є на відрізку $[0 \le s \le 2L]$ матиме вигляд:

$$F(s) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N}\left(a_n\cos\frac{sn\pi}{L} + b_n\sin\frac{sn\pi}{L}\right), \tag{16}$$

де

$$a_0 = \frac{1}{L}\int_{s=0}^{2L} f(s)ds;$$

$$a_i = \frac{1}{L}\int_{s=0}^{2L} f(s)\cos\frac{is\pi}{L}ds; \tag{17}$$

$$b_i = \frac{1}{L}\int_{s=0}^{2L} f(s)\sin\frac{is\pi}{L}ds.$$

У виразах (17) замість f(s) необхідно обирати функції $f_X(s)$ або $f_Y(s)$ залежно від координати обчислення.

У результаті отримаємо опис меридіану поверхні обертання у аналітичному вигляді:

$$x(t) = \int \frac{1}{2}\left(\frac{1}{L}\int_{-L}^{L}\cos\left(\int_0^t k(s)ds\right)dt\right) + \left(\sum_{n=1}^{N} b_n\cos\left(\frac{\pi nt}{L}\right)\right)dt,$$

$$y(t) = \int \frac{1}{2}\left(\frac{1}{L}\int_{-L}^{L}\sin\left(\int_0^t k(s)ds\right)dt\right) + \left(\sum_{n=1}^{N} b_n\sin\left(\frac{\pi nt}{L}\right)\right)dt. \tag{18}$$

Але при практичному застосуванню формули (18) мають надто громіздкий вигляд. Тому користуватися ними доцільно застосовуючи комп'ютерні процесори,

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

спроможні здійснювати роботу з формулами на аналітичному рівні. Ми використовували пакет maple.

5.2. Побудова фасонної поверхні обертання з намоткою по геодезичним з урахуванням кривини меридіана

Побудову фасонної поверхні обертання з намоткою по геодезичним залежно від зазначеної функції кривини меридіана будемо розв'язувати у два етапи. Спочатку побудуємо поверхню обертання, у якої середня кривина змінюється вздовж її осі за законом $k(s) = \cos s$.

Система рівнянь Френе у нашому випадку матиме вигляд:

$$\frac{d}{dt}x(t) = \cos(\sin t);$$

$$\frac{d}{dt}y(t) = \sin(\sin t). \qquad (19)$$

Розв'язання системи рівнянь (19) одержимо у вигляді:

$$x(t) = \int \cos(\sin t)dt + _{C1};$$

$$y(t) = \int \sin(\sin t)dt + _{C2}. \qquad (20)$$

Константи інтегрування можна обрати нульовими. Підінтегральні вирази у формулах (20) точно не обчислюються. Тому ми застосуємо розкладання підінтегральних виразів у ряд Фур'є. Шляхом проведення комп'ютерних експериментів показано, що кількість елементів розкладу N=17 буде прийнятним для наближення підінтегральних виразів з необхідною точністю. У результаті з використанням формул (18), отримуємо параметричний опис x=x(t), y=y(t) меридіану поверхні обертання (рис. 11), у якої середня кривина змінюється вздовж осі за законом k(s)=cos(s).

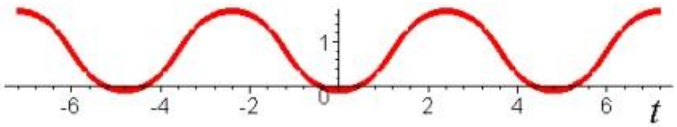


Рис. 11. Меридіан поверхні обертання, у якій середня кривина змінюється вздовж осі за законом k(s)=cos(s)

За умови визначених параметричного опису {x=x(t), y=y(t)} меридіану, рівняння поверхні обертання матиме вигляд:

$$S = \{x(u), \sin v(y(u)) + h, \cos v(y(u)) + h\}, \qquad (21)$$

де h – величина зміщення меридіана поверхні відносно осі обертання.

На рис. 12 зображено поверхню обертання (з умовним розрізом), у якій середня кривина змінюється вздовж осі за законом k(s)=cos(s).

На другому етапі досліджень на одержаній поверхні для її зміцнення слід побудувати множини геодезичних кривих. Опис геодезичних кривих на фасонних

поверхнях обертання будемо здійснювати за допомогою складання та розв'язання системи диференціальних рівнянь. Використання формул Фур'є дозволяє визначати аналітичні вирази опису фасонних поверхонь і геодезичних.

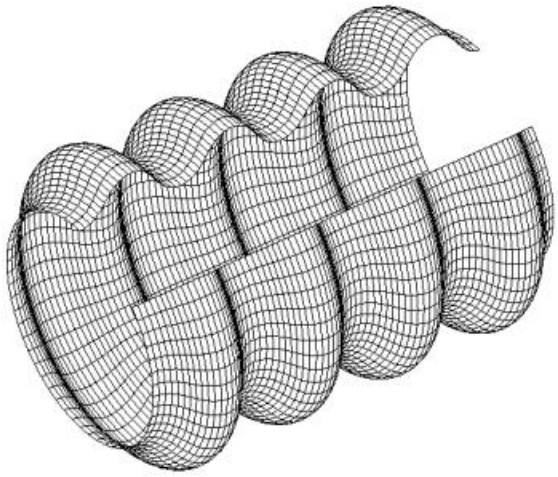


Рис. 12. Поверхня з визначеним меридіаном, де середня кривина змінюється вздовж осі за законом k(s)=cos(s)

Розв'язання системи диференціальних рівнянь з належними крайовими умовами дозволяє описати відповідну геодезичну криву на фасонній поверхні обертання. Але одержані аналітичні залежності мають громіздкий вигляд і тут не наводяться. Детально про це сказано в роботі [17]. Переконатися у громіздкості аналітичних виразів можна за допомогою фрагмента maple програми, наведеної далі в цьому підрозділі.

На рис. 13 в якості прикладу зображено різновиди проекцій одержаної фасонної поверхні обертання залежно від обраних початкових умов. Проілюстровано розташування першої сім'ї геодезичних ліній на пневматичній поверхні. Розташування другої сім'ї геодезичних ліній буде симетричним стосовно кута обертання осі поверхні.

Одержану фасонну поверхню умовно назвемо «жорсткою», зважаючи на геометричну форму її згинів. Саме згини такої форми мають пневматичні амортизатори автомобілів та пневматичні домкрати у автомобільних майстернях.

Далі розглянемо фасонну поверхня обертання з геодезичною намоткою залежно від функції $k(s)=\cos s+\frac{1}{3}\cos(s/3)$ зміни кривини меридіана. На рис. 14 зображено графік функції k(s).

Повторюючи ідею попереднього прикладу наведемо опис та побудову поверхні обертання, у якої середня кривина змінюється вздовж її осі за обраним законом. В цьому випадку система рівнянь Френе матиме вигляд:

$$\frac{d}{dt}x(t)=\cos(\sin(t)+\sin(t/3));\ \frac{d}{dt}y(t)=\sin(\sin(t)+\sin(t/3)). \qquad (22)$$

Розв'язання системи рівнянь (22) має вигляд:

$$x(t)=\int\cos(\sin(t)+\sin(t/3))\,dt+_{C1};\ y(t)=\int\sin(\sin(t)+\sin(t/3))\,dt+_{C2}. \qquad (23)$$

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

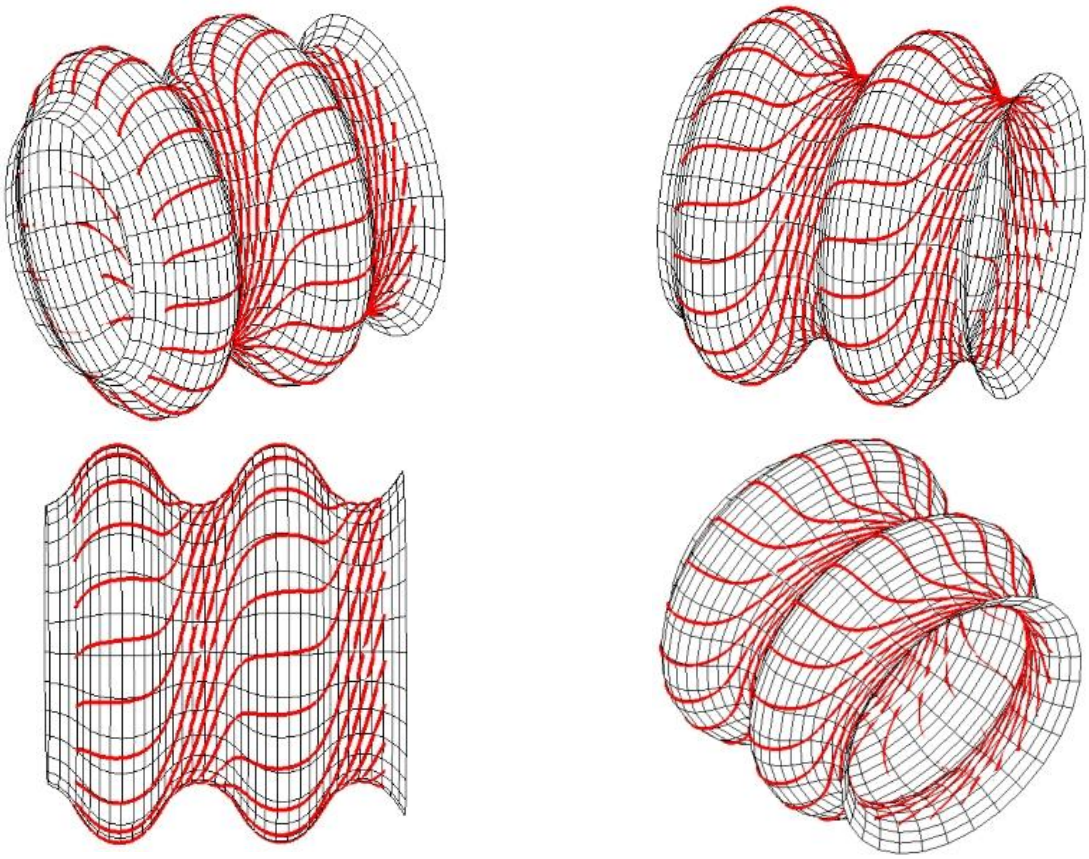


Рис. 13. Зображення знайденої поверхні обертання з сім'єю геодезичних на ній

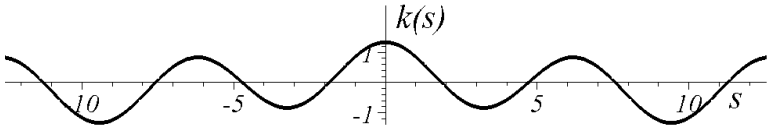


Рис. 14. Графік функції k(s)

Константи інтегрування оберемо нульовими. Підінтегральні вирази точно не обчислюються, тому здійснимо їх розклад у ряд Фур'є. При N=17 одержимо необхідні наближення підінтегральних виразів у формулі (23).

Використовуючи формули (18) отримуємо параметричний опис x=x(t), y=y(t) меридіану поверхні обертання, в якої середня кривина змінюється вздовж осі за законом $k(s)=\cos s+\frac{1}{3}\cos(s/3)$. Функції x=x(t) і y=y(t) мають громіздкий вигляд і тут не наводяться. На практиці вони реалізуються машинними кодами програми maple. На рис. 15 наведено зображення меридіану, описаного параметричним рівнянням { x=x(t); y=y(t) }.

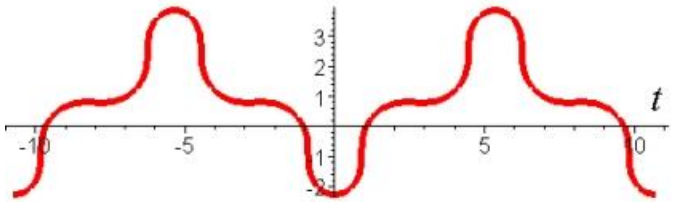


Рис. 15. Зображення меридіану поверхні обертання, в якої середня кривина змінюється за законом $k(s)=\cos s+\frac{1}{3}\cos(s/3)$

На рис. 16 зображено (з розрізом) пневматичну поверхню з визначеним меридіаном.

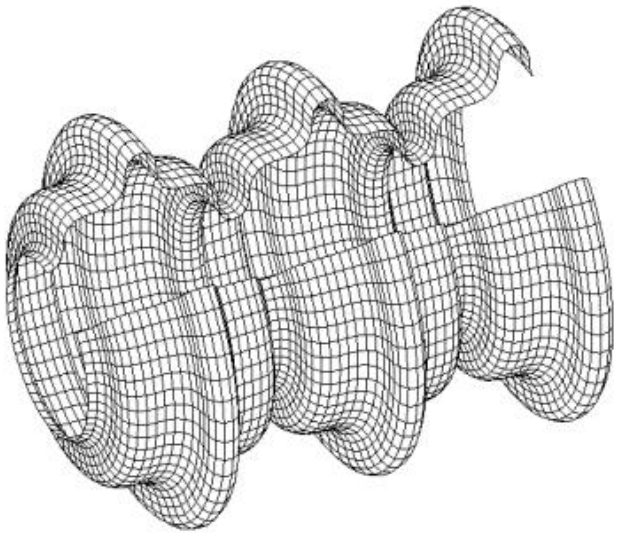


Рис. 16. Пневматична поверхня з визначеним меридіаном

Далі розглянемо геодезичне намотування поверхонь обертання, у яких кривина меридіана змінюється за законом $k(s)=\cos s+\frac{1}{3}\cos(s/3)$. Для цього необхідно звернутися до складеної maple-програми [17]. Варіант її реалізації наведено на рис.17.

Наведена програма дозволяє розв'язати систему диференціальних рівнянь і одержати описи двох сімей геодезичних. Їх описи будуть представлені у вигляді кодів мови maple. В програмі вони не розкриті з причини громіздкості їх виразів. Система диференціальних рівнянь розв'язується залежно від обраних початкових умов, у результаті чого одержуємо зображення геодезичних на поверхні обертання.

Зазначимо, що перед застосуванням фрагмента програми з рис. 17, необхідно визначити параметричні рівняння {x(u), y(u)} меридіана поверхні обертання:

$$[x(u), (y(u) + h)*\cos(v), (y(u) + h)*\sin(v)],$$

де h – величина зміщення меридіана поверхні відносно осі обертання.

На рис. 18 а, б наведено одержані геодезичні на фасонній поверхні залежно від різних початкових умов.

Універсальність запропонованої методики «конструювання» геодезичних кривих на фасонних поверхнях полягає у тому, що зазначене криві можна будувати лише на зарання обраних фрагментах поверхні. Саме тих, які схильні до руйнування. Фасонну поверхню такого виду умовно будемо називати «м'якою», зважаючи на геометричну форму її згинів. Отже, в роботі розглядалося два варіанти дії геометричної форми фасонних поверхонь, умовно розділених на «жорстку» і «м'яку». Перша призначена для застосування в звичайних транспортних засобах, а друга – в транспортних засобах спеціального призначення. Наприклад, в причепах для перевозки вибухонебезпечних виробів, для яких «м'якість» підвіски забезпечить проходимість по шляхам зі складним рельєфом.

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

```
Xu :=[diff(X[1],u),diff(X[2],u),diff(X[3],u)]:
 Xv := [diff(X[1],v),diff(X[2],v),diff(X[3],v)]:
 dp := proc(X,Y) X[1]*Y[1]+X[2]*Y[2]+X[3]*Y[3] end:
 E := simplify(dp(Xu,Xu)):
 F := simplify(dp(Xu,Xv)):
 G := simplify(dp(Xv,Xv)):
 zna := E*G – F*F:
 Eu:=diff(E,u): Ev:=diff(E,v):
Fu:=diff(F,u): Fv:=diff(F,v):
Gu:=diff(G,u): Gv:=diff(G,v):
# система диференціальних рівнянь
 eq1 := diff(u(t),t$2) + subs( {u=u(t),v=v(t)},
(G*Eu-F*(2*Fu-Ev))/(2*zna) )*diff(u(t),t)^2
+ subs( {u=u(t),v=v(t)} , (G*Ev-F*Gu) / zna )
*diff(u(t),t)*diff(v(t),t)
+ subs( {u=u(t),v=v(t)} , (G*(2*Fv-Gu)-F*Gv) /
 (2*zna) )*diff(v(t),t)^2=0:
 eq2:=diff(v(t),t$2) + subs( {u=u(t),v=v(t)} ,
(E*(2*Fu-Ev)-F*Eu) / (2*zna) )*diff(u(t),t)^2
+ subs( {u=u(t),v=v(t)} , (E*Gu-F*Ev) / (zna) )
*diff(u(t),t)*diff(v(t),t)
+ subs( {u=u(t),v=v(t)} , (E*Gv-F*(2*Fv-Gu)) /
(2*zna) )*diff(v(t),t)^2=0:
 sys:=eq1, eq2:

 N := 40:
 for i from 0 to N do
 vbeg := i*2*Pi/N:
 ubeg := 1: dubeg := 2.2: dvbeg := 1:
 desys := dsolve({sys, u(0)=ubeg, v(0)=vbeg,
D(u)(0)=dubeg, D(v)(0)=dvbeg}, {u(t),v(t)}, type=numeric,
output=listprocedure);
 u1 := subs(desys, u(t));
v1 := subs(desys, v(t));
 geo1[i] := spacecurve(subs(u=‘u1’(t),
v=‘v1’(t), X), t=0..13, color=red, thickness=4,numpoints=200):
geo2[i] := spacecurve(subs(u=‘u1’(t),
v=-’v1’(t), X), t=0..13, color=green, thickness=4,numpoints=200):
 end:
 plotX := plot3d(X,u=0..35,v=0..2*Pi, grid=[50, 40], color=white):
 display({seq(geo1[i], i=0..N), seq(geo2[i], i=0..N), plotX},
scaling=constrained, orientation=[-65, 60]);
```

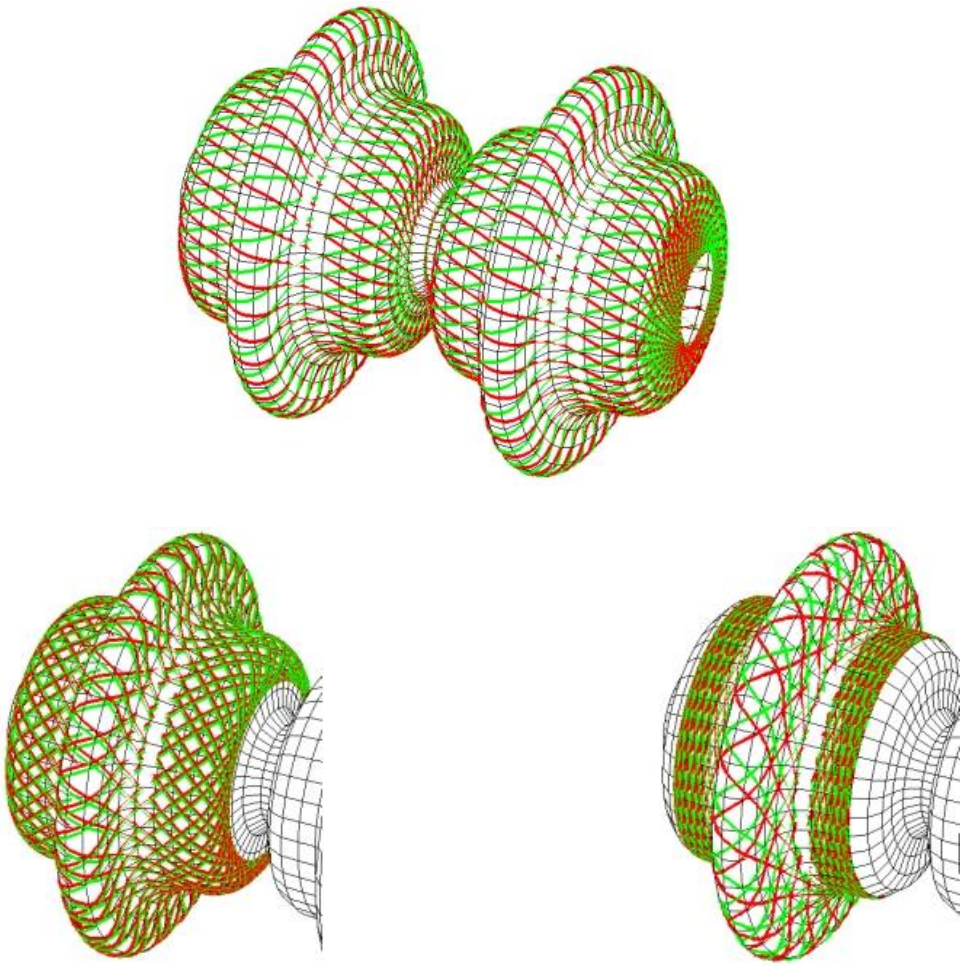
Рис. 17. Фрагмент maple-програми побудови геодезичних на фасонній поверхні

5.3. Визначення геодезичної намотки на гофрований поверхні на випадок меридіана пилкоподібної форми

Далі розглянемо опис і побудову зображення гофрованої поверхні, зміцненої намотуванням нитки. Нехай меридіан поверхні обертання описано рівнянням:

$$z = p + \frac{\arccos(\cos(u/q))}{q}, \tag{24}$$

форма якого при p=9 і q=1 має пилоподібний вигляд (рис. 19).



а) **б)**

Рис. 18. Геодезичні на фасонній поверхні: а – на всій поверхні обертання; б – на частині поверхні обертання

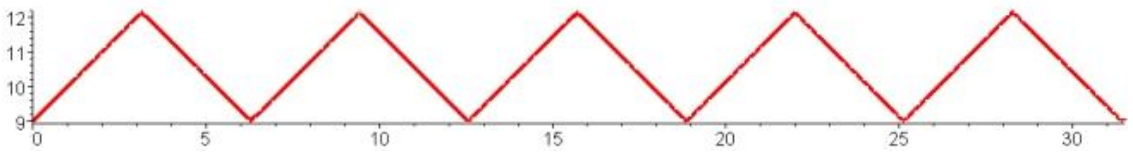


Рис. 19. Пилкоподібна форма меридіана

Опис гофрованої поверхні як поверхні обертання визначається формулами:

$$\left(u, p + \frac{\arccos(\cos(u/q)}{q}\cos v, \frac{\arccos(\cos(u/q)}{q}\sin v\right), \tag{25}$$

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

де p=9 і q=1.

Для складання системи диференціальних рівнянь геодезичних для цієї поверхні обертання необхідно визначити коефіцієнти квадратичної форми

$$E = \frac{q^4 + 1}{q^4};\ F = 0;\ G = \frac{\left(pq + \arccos(\cos(u/q))\right)^2}{q^2}. \qquad (26)$$

В результаті одержуємо систему диференціальних рівнянь для опису геодезичних ліній на гофрованій поверхні:

$$\frac{d^2}{dt^2}u(t) = \frac{1}{2}\frac{9 + \arccos(\cos(u(t)))\sin(u(t))}{\sqrt{1-\cos^2 u(t)}}\left(\frac{d}{dt}v(t)\right)^2;$$

$$\frac{d^2}{dt^2}v(t) = -\frac{2\sin(u(t))}{(9 + \arccos(\cos(u(u))))\sqrt{1-\cos^2 u(t)}}\frac{d}{dt}u(t)\frac{d}{dt}v(t). \qquad (27)$$

На рис. 20 наведено зображення, одержане в результаті розв’язання системи рівнянь залежно від початкових умов.

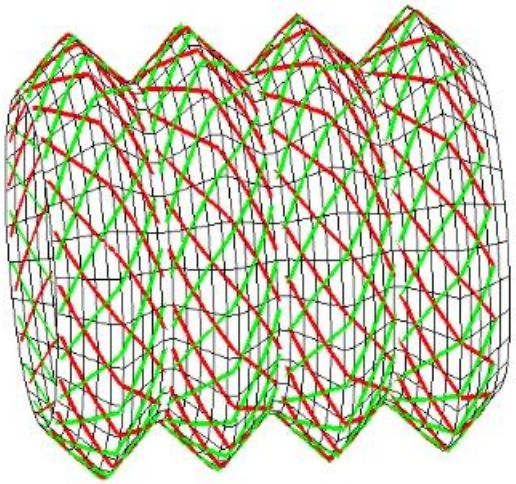


Рис. 20. Приклад геодезичного намотування гофрованої поверхні

На рис. 21 наведено приклад зміни форми розтягнення геодезичних залежно від величини сили стискання гофрованої поверхні (в режимі пневматичної поверхні).

В перспективі дослідження в цьому напрямку доцільно продовжити з метою виявлення формальних ознак існування сім’ї геодезичних кривих на знайденій гофрованій поверхні.

6. Обговорення результатів дослідження форм меридіанів поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки

Отримані результати пояснюються причино-наслідковим зв’язком між геометричними формами пневматичних поверхонь і їх фізичними властивостями. В даній роботі увагу приділено поверхням, для яких характерним фактором є їх стала середня кривина. Якщо такі поверхні використати в конструкціях пневматичного обладнання, то всі ділянки виявляться рівно напруженими – тобто рівно ймовірними щодо їх руйнування в процесі експлуатації.

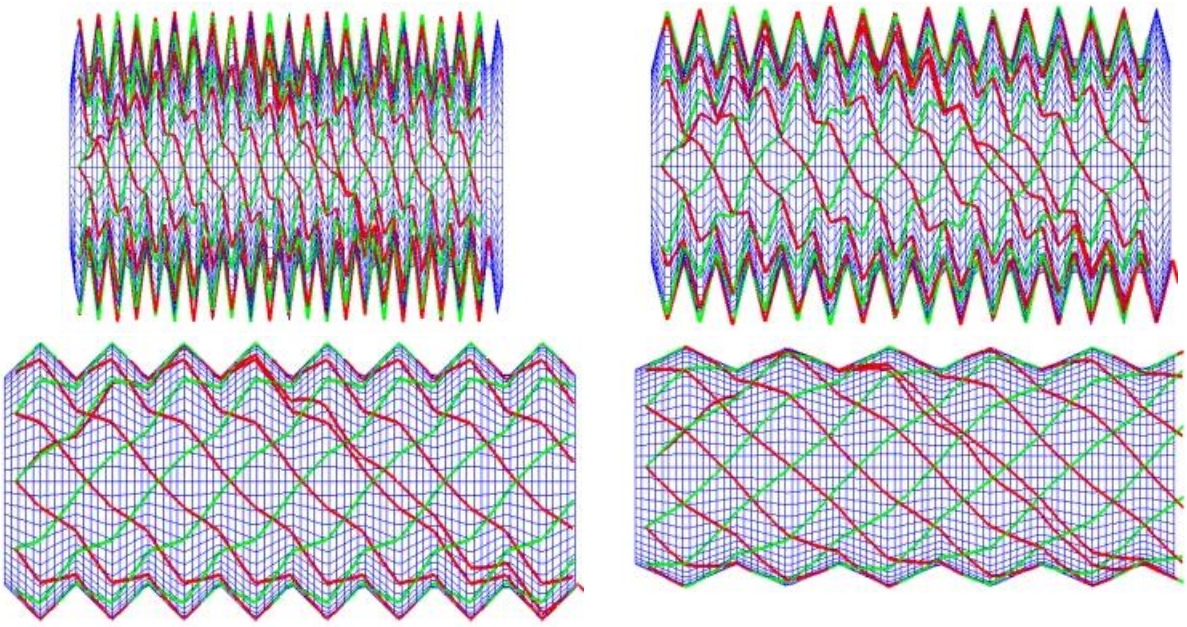


Рис. 21. Зміна форми геодезичних залежно від стискання гофрованої поверхні

Особливості запропонованого методу і отриманих результатів полягають у реалізації основної властивості поверхонь сталої середньої кривини. Згадана властивість полягає у тому, що середня кривина поверхні розділу двох врівноважених фізичних середовищ пропорційна різниці значень тисків у їх суміжних порожнинах. Отже, варіюючи середньою кривиною поверхні, можна обирати величину тиску, яку теоретично має витримати пневматичний виріб. В порівнянні з існуючими методами розрахунку цей результат надається майже «даром». Залишається лише врахувати обмеження при збільшенні тиску. Обмеження пов'язані з механічними властивостями міцності матеріалу, з якого виготовлена робоча пневматична поверхня.

Наведеним дослідженням притаманні певні обмеження, пов'язані з необхідністю «стиковки» розрахованої геометричної форми пневматичної поверхні з множиною геодезичних кривих для її зміцнення намоткою нитки. Тобто для функціонування виробу в умовах навантаження зусиллями вздовж осі, поверхню виробу доцільно зміцнити (армувати) шляхом намотування нитки. Для цього як геометричну модель намотки нитки необхідно розрахувати множину геодезичних кривих, узгоджених з формою фасонної поверхні обертання. Це тема майбутніх досліджень.

Недоліки напрямку проведеного дослідження можуть виявитися у випадках принципової неможливості погодити утворення сім'ї геодезичних кривих на знайденій фасонній поверхні. В перспективі дослідження в цьому напрямку доцільно продовжити з метою виявлення формальних ознак існування сім'ї геодезичних кривих на знайденій фасонній поверхні.

Розвиток проведених досліджень можливо здійснити у напрямку створення програмних систем автоматизованого розрахунку фасонних (і гофрованих) пневматичних поверхонь, поєднаних з розрахунком сім'ї відповідних геодезичних кривих.

7. Висновки

1. В результаті обчислень було визначено форми меридіана фасонної поверхні обертання шляхом розв'язання оберненої задачі. На відміну від

 © Л. М. Куценко, С. Ю. Руденко, А. Я. Калиновський, О. Г. Поліванов та ін.

розв'язання прямої задачі, яка зводиться до підбору двох функцій f(u) і g(u) за критерієм, який погано формалізується. А саме: необхідно забезпечити «фасонність» поверхні обертання, зручної для застосування у пневматичних виробах. Тому на відміну від оберненої задачі в роботі наведено спосіб розв'язання прямої задачі – тобто визначення меридіана поверхні обертання, зручної для експлуатації на практиці. За заданою функцією зміни вздовж осі середньої кривини поверхні обертання в роботі визначено опис (тобто рівняння) меридіана. Особливістю роботи полягає у застосуванні натуральних рівнянь при розрахунках опису та зображення кривих.

2. Розроблений спосіб дозволив розрахувати геодезичну намотку для забезпечення міцності фасонної поверхні обертання залежно від функції зміни кривини меридіана. Це вдалося зробити завдяки вдалому розв'язку системи диференціальних рівнянь Френе. Оскільки інтеграли у одержаних виразах (14) точно не обчислюються, тому на практиці для побудови кривої в роботі застосовано метод розкладення підінтегральних функцій у ряд Фур'є. У результаті отримано параметричний опис меридіану поверхні обертання (18). В роботі розглядалося два варіанти дії геометричної форми фасонних поверхонь, умовно розділених на «жорстку» і «м'яку». Перша призначена для застосування в звичайних транспортних засобах, а друга – в транспортних засобах спеціального призначеннях. Наприклад, в причепах для перевозки вибухонебезпечних виробів, для яких «м'якість» підвіски забезпечить проходимість по шляхам зі складним рельєфом.

3. Побудову геодезичної намотки ниткою в роботі узагальнено на випадок гофрованої поверхні з меридіаном пилкоподібної форми. Для цього одержано рівняння (25) гофрованої поверхні як поверхні обертання. Для складання системи диференціальних рівнянь геодезичних ліній для цієї поверхні обертання було визначено коефіцієнти квадратичної форми (26). В результаті одержано систему диференціальних рівнянь (27) для опису геодезичних ліній. На завершення запропоновано maple- програму розв'язання системи рівнянь геодезичний кривих залежно від крайових умов. Розв'язки ілюстровано зображеннями геодезичних ліній на гофрованій поверхні, що доказує коректність одержаного розв'язку.

Література

1. Гідравлічне та пневматичне аварійно-рятувальне обладнання з приналежностями. Weber-hydraulik Ukraine, 2020. 41 с. URL: https://www.weber-rescue.com.ua/wp-content/uploads/2020/10/Katalog-2020.pdf

2. Пожежна та аварійно-рятувальна техніка. Історія, сьогодення, минуле : монографія / О. М. Ларін та ін. Харків : НУЦЗУ, 2005. 160 с.

3. Борисенко О. А. Диференціальна геометрія і топологія. Харків : Основа, 1995. 304 с.

4. Задачин В. М., Конюшенко І. Г. Чисельні методи: навч. посіб. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.

5. Малишко П. Е., Орлов М. Є. Конструювання балонів для зберігання стисненого газу. Збірник тез доповідей: Зб. тез доп. 76-ї всеукр. науково-практ. студент. онлайн-конф. «Наук. здобутки студентів у дослідж. техн. та біоенерг. систем природокористування: конструювання та дизайн». Ф-т, м. Київ, 26–27 квітня 2023. С. 63–64.

6. Mladenov I. M., Hadzhilazova M. T. Geometry of the anisotropic minimal

surfaces. Analele Universitatii «Ovidius» Constanta – Seria Matematica. 2012. Vol. 20(2). P. 79–88. doi: 10.2478/v10309-012-0042-3

7. Perdomo O. M. The treadmillsled of a curve. arXivLabs. 17 May 2011. URL: https://arxiv.org/abs/1105.3460v1

8. Kenmotsu K. Surfaces of revolution with prescribed mean curvature. Tohoku Mathematical Journal. 1980. Vol. 32. № 1. P. 147–153. doi: 10.2748/tmj/1178229688

9. Hoffmann T. Discrete Rotational CMC Surfaces and the Elliptic Billiard. In: Hege, HC., Polthier, K. (eds) Mathematical Visualization. Springer. 1998. P. 117–124. doi: 10.1007/978-3-662-03567-2_9

10. Cho J., Leschke K., Ogata Y. Generalised Bianchi permutability for isothermic surfaces. Annals of Global Analysis and Geometry. 2022. Vol. 61. P. 799–829. doi: 10.1007/s10455-022-09833-5

11. Chao Y., Shen L. M., Liu M. P. Mechanical characteristic and analytical model of novel air spring for ergonomic mattress. Mechanics & Industry. 2021. Vol. 22(37). doi: 10.1051/meca/2021035

12. de Melo F., Pereira A., Morais A. The Simulation of an Automotive Air Spring Suspension Using a Pseudo-Dynamic Procedure. Applied Sciences. 2018. Vol. 8. № 7. P. 1049. doi: 10.3390/app8071049

13. Renka R. J. A Simple and Efficient Method for Modeling Constant Mean Curvature Surfaces. SIAM Journal on Scientific Computing. 2015. Vol. 37. № 4. P. A2076–A2099. doi: 10.1137/140972275

14. Pneumatic Artificial Muscles. URL: https://softroboticstoolkit.com/book/export/html/168891

15. Al-Ibadi A., Nefti-Meziani S., Davis S. Active Soft End Effectors for Efficient Grasping and Safe Handling. IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 23591–23601. doi: 10.1109/access.2018.2829351

16. Du H., Liu W., Bian X., Xiong W. Energy-Saving for Industrial Pneumatic Actuation Systems by Exhausted Air Reuse Based on a Constant Pressure Elastic Accumulator. Sustainability. 2022. Vol. 14. № 6. P. 3535. doi: 10.3390/su14063535

17. Paragoda T. Constant Mean Curvature Surfaces of Revolution versus Willmore Surfaces of Revolution: A Comparative Study with Physical Applications. Texas Tech University, 2014. 42 p.

18. Ciric M. Notes on constant mean curvature surfaces and their graphical presentation. Filomat. 2009. Vol. 23. № 2. P. 97–107. doi: 10.2298/fil0902097c

19. Hoque M. A., Petersen E., Fang X. Effect of Material Properties on Fiber-Shaped Pneumatic Actuators Performance. Actuators. 2023. Vol. 12. № 3. P. 129. doi: 10.3390/act12030129

20. Pan H., Choi Y.-K., Liu Y., Hu W., Du Q., Polthier K., et al. Robust modeling of constant mean curvature surfaces. ACM Transactions on Graphics. 2012. Vol. 31. № 4. P. 1–11. doi: 10.1145/2185520.2185581

21. Arnal A., Lluch A., Monterde J. Triangular Bŕezier approximations to Constant Mean Curvature surfaces Conference: Computational Science – ICCS 2008, 8th International Conference, Kraków, Poland, June 23-25. 2008. Proceedings, Part II. doi: 10.1007/978-3-540-69387-1_11

22. Ball E., Garcia E. Effects of Bladder Geometry in Pneumatic Artificial Muscles. Journal of Medical Devices. 2016. Vol. 10. № 4. doi: 10.1115/1.4033325

23. Пилипака С., Коровіна І. Конструювання поверхонь обертання сталої середньої кривини. Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції

«Перспективи розвитку агропромислового комплексу в Поліському регіоні України». Ніжин: Міланік. 2010. С. 35–43.

24. Руденко С. Ю. Поверхні обертання, у яких значення середньої кривини близькі до нуля. Прикладна геометрія та інженерна графіка. К.: Будівельник. 2013. Вип. 91. С. 240–244.

25. Руденко С. Ю. Геометричне моделювання фасонних поверхонь обертання, зміцнених намотуванням нитки : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.01.01. Київ, 2013. 24 с.

26. Куценко Л., Руденко С. Поверхні обертання зі змінної уздовж осі кривиною меридіанів та їх зміцнення шляхом намотування кевларової нитки. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Луцьк: ЛДТУ. 2011. Вип. 6. С. 148–153.

L. Kutsenko, *DSc, Professor, Professor of the Department*
S. Rudenko, *PhD, Lecturer of the Department*
A. Kalynovskyi, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
O. Polivanov, *PhD, Lecturer of the Department*
O. Sukharkova, *Lecturer of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

GEOMETRIC MODELING OF PNEUMATIC SHAPED SURFACES OF ROTATION, REINFORCED BY WINDING THREAD

A scheme is proposed for calculating the geometric forms of the family of meridians of a rubber pneumatic shaped surface of rotation depending on the function of changing the average curvature along the axis of this surface. It is proposed to strengthen the resulting shaped surface of rotation by winding the thread along the geodesic curves of the found surface. A method has been developed for determining the approximate shape of the elements of the family of meridians of the pneumatic surface of rotation. In addition, constructed surfaces of revolution, strengthened by winding threads along their geodesic lines, depending on the function of changing the curvature of the meridian. As a result, images of geodesic curves on shaped surfaces of revolution were obtained. The construction of a geodesic thread winding on a corrugated surface is generalized for the case of a sawtooth-shaped meridian. It is advisable to model a pneumatic surface based on calculating its average curvature. Since the value of the average curvature of the interface between two balanced physical media is proportional to the difference in pressure values in these media. By varying the average curvature of the surface, you can choose the amount of pressure that the pneumatic product will withstand. Approximate descriptions of the shape of the meridian of the shaped surface of revolution are obtained by solving the direct and inverse problems. The parameters of geodetic winding are calculated depending on the given meridian curvature function. The construction of geodesic winding of a thread on a corrugated surface is generalized for the case of a sawtooth-shaped meridian. For practice, the studies conducted are useful and important, since they provide calculations of rational pneumatic products intended for use during emergency rescue operations.

Keywords: meridian of the surface of revolution, average curvature of the surface, corrugated surface of revolution, reinforcement by thread winding

References

1. Hidravlichne ta pnevmatychne avariino-riatuvalne obladnannia z prynalezhnostiamy. WEBER-HYDRAULIK UKRAINE, 41. Available at: https://www.weber-rescue.com.ua/wp-content/uploads/2020/10/Katalog-2020.pdf

2. Larin, O. (2005). Pozhezhna ta avariino-riatuvalna tekhnika. Istoriia, sohodennia, mynule : monohrafiia. Kharkiv : NUCDU, 160.

3. Borysenko, O. (1995). Dyferentsialna heometriia i topolohiia. Kharkiv: Osnova, 304.

4. Zadachyn, V., Koniushenko, I. (2014). Chyselni metody: navch. posib.

Kharkiv: KhNEU im. S. Kuznetsia, 180.

5. Malyshko, P., Orlov, M. (2023). Konstruiuvannia baloniv dlia zberihannia stysnenoho hazu. Zbirnyk tez dopovidei: Zb. tez dop. 76-yi vseukr. naukovo-prakt. student. onlain-konf. «Nauk. zdobutky studentiv u doslidzh. tekhn. ta bioenerh. system pryrodokorystuvannia: konstruiuvannia ta dyzain». F-t, m. Kyiv, 63–64.

6. Mladenov, I., Hadzhilazova, M. (2012). Geometry of the anisotropic minimal surfaces. Analele Universitatii «Ovidius» Constanta – Seria Matematica, 20(2), 79–88. doi: 10.2478/v10309-012-0042-3

7. Perdomo, O. (2011). The treadmillsled of a curve. arXivLabs. Available at: https://arxiv.org/abs/1105.3460v1

8. Kenmotsu, K. (1980). Surfaces of revolution with prescribed mean curvature. Tohoku Mathematical Journal, 32, 1, 147–153. doi: 10.2748/tmj/1178229688

9. Hoffmann, T. (1998). Discrete Rotational CMC Surfaces and the Elliptic Billiard. In: Hege, HC., Polthier, K. (eds) Mathematical Visualization. Springer, 117–124. doi: 10.1007/978-3-662-03567-2_9

10. Cho, J., Leschke, K., Ogata, Y. (2022). Generalised Bianchi permutability for isothermic surfaces. Annals of Global Analysis and Geometry, 61, 799–829. doi: 10.1007/s10455-022-09833-5

11. Chao, Y., Shen, L., Liu, M. (2021). Mechanical characteristic and analytical model of novel air spring for ergonomic mattress. Mechanics & Industry, 22, 37. doi: 10.1051/meca/2021035

12. de Melo, F., Pereira, A., Morais, A. (2018). The Simulation of an Automotive Air Spring Suspension Using a Pseudo-Dynamic Procedure. Applied Sciences, 8, 7, 1049. doi: 10.3390/app8071049

13. Renka, R. (2015). A Simple and Efficient Method for Modeling Constant Mean Curvature Surfaces. SIAM Journal on Scientific Computing, 37, 4, A2076–A2099. doi: 10.1137/140972275

14. Pneumatic Artificial Muscles. Available at: https://softroboticstoolkit.com/book/export/html/168891

15. Al-Ibadi, A., Nefti-Meziani, S., Davis, S. (2018). Active Soft End Effectors for Efficient Grasping and Safe Handling. IEEE Access, 6, 23591–23601. doi: 10.1109/access.2018.2829351

16. Du, H., Liu, W., Bian, X., Xiong, W. (2022). Energy-Saving for Industrial Pneumatic Actuation Systems by Exhausted Air Reuse Based on a Constant Pressure Elastic Accumulator. Sustainability, 14, 6, 3535. doi: 10.3390/su14063535

17. Paragoda, T. (2014). Constant Mean Curvature Surfaces of Revolution versus Willmore Surfaces of Revolution: A Comparative Study with Physical Applications. Texas Tech University, 42.

18. Ciric, M. (2009). Notes on constant mean curvature surfaces and their graphical presentation. Filomat, 23, 2, 97–107. doi: 10.2298/fil0902097c

19. Hoque, M., Petersen, E., Fang, X. (2023). Effect of Material Properties on Fiber-Shaped Pneumatic Actuators Performance. Actuators, 12, 3, 129. doi: 10.3390/act12030129

20. Pan, H., Choi, Y.-K., Liu, Y., Hu, W., Du, Q., Polthier, K., et al. (2012). Robust modeling of constant mean curvature surfaces. ACM Transactions on Graphics, 31, 4, 1–11. doi: 10.1145/2185520.2185581

21. Arnal, A., Lluch, A., Monterde, J. (2008). Triangular Bŕezier approximations to Constant Mean Curvature surfaces Conference: Computational Science – ICCS 2008,

8th International Conference, Kraków, Poland, Proceedings, Part II. doi: 10.1007/978-3-540-69387-1_11

22. Ball, E., Garcia, E. (2016). Effects of Bladder Geometry in Pneumatic Artificial Muscles. Journal of Medical Devices, 10, 4. doi: 10.1115/1.4033325

23. Pylypaka, S., Korovina, I. (2010). Konstruiuvannia poverkhon obertannia staloi serednoi kryvyny. Materialy III Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Perspektyvy rozvytku ahropromyslovoho kompleksu v Poliskomu rehioni Ukrainy». Nizhyn: Milanik, 35–43.

24. Rudenko, S. (2013). Poverkhni obertannia, u yakykh znachennia serednoi kryvyny blyzki do nulia. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika. K.: Budivelnyk, 91, 240-244.

25. Rudenko, S. (2013). Heometrychne modeliuvannia fasonnykh poverkhon obertannia, zmitsnenykh namotuvanniam nytky: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk : 05.01.01. Kyiv, 24.

26. Kutsenko, L. Rudenko, S. (2011). Poverkhni obertannia zi zminnoi uzdovzh osi kryvynoiu merydianiv ta yikh zmitsnennia shliakhom namotuvannia kevlarovoi nytky. Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo. Lutsk: LDTU, 6, 148–153.

Надійшла до редколегії: 05.03.2024
Прийнята до друку: 11.04.2024

УДК 621.03

Б. Б. Поспєлов, *д.т.н., професор, провідн. н.с. (ORCID 0000-0002-0957-3839)*
Є. О. Рибка, *д.т.н., професор, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)*
Р. Г. Мелещенко, *д.т.н., професор, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5411-2030)*
Ю. С. Безугла, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4022-2807)*
О. А. Ященко, *к.е.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-7129-389X)*
П. Ю. Бородич, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-9933-8498)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ СЕРЕДНЬОЇ БІКОГЕРЕНТНОСТІ ДИНАМІКИ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ПОЯВІ ЗАГОРЯНЬ

Об’єктом дослідження є небезпечні параметри газового середовища при загораннях матеріалів у приміщеннях. Важливість такого дослідження пов’язана з можливістю використання міри середньої бікогерентності для виявлення загорянь та попередження надзвичайних ситуацій в наслідок пожежі. Обґрунтовано міру середньої бікогерентності довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному часовому інтервалі. Експериментально вивчені особливості міри середньої бікогерентності частотних складових спектра основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння типових матеріалів загоряння. Результати свідчать, що динаміки небезпечних параметрів газового середовища в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь носить складний нелінійний характер. Встановлено, що різниця міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища при наявності та відсутності загорянь має неоднаковий та індивідуальний характер. Зазначено, що індивідуальні особливості міри середньої бікогерентності можуть виступати як можлива ознака щодо виявлення загорянь. Встановлено, що максимальне значення міри, що дорівнює 1,0, для усіх частотних індексів має місце перед загоранням спирту та паперу. Перед загоранням деревини та текстилю значення міри по частотних індексах мають випадковий характер та лежать в межах від 0,4 до 0,8. Встановлено, що загоряння матеріалів призводять до втрати початкових взаємозв’язків третього порядку між частотними складовими у спектрах. Це дозволяє розглядати вказану втрату зв’язків в якості загальної ознаки щодо виявлення загорянь шляхом обчислення запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища у приміщеннях.

Ключові слова: міра, середня бікогерентність, зміна небезпечних параметрів, газове середовище, загоряння матеріалу

1. Вступ

На сучасному етапі постійного зростання різних типів загроз важливою проблемою є забезпечення стійкого функціонування об’єктів [1]. Особливе місце [2, 3] посідають об’єкти критичної інфраструктури, які є джерелами виникнення надзвичайних ситуацій та небезпечних подій [4]. Джерелами різних загроз і небезпечних подій виступають практично усі об’єкти технічної [5, 6] та соціально-економічної сфери [7, 8]. Зазвичай загрози та надзвичайні ситуації оцінюють рівнем завданих ними збитків та частотою їх появи. З огляду на це максимальна частота появи та рівень збитків характерні пожежам у приміщеннях (ПП) [9]. ПП завдають великої шкоди як здоров’ю людини [10, 11], так і власно об’єктам [12]. Крім того власно ПП та пожежна техніка, що використовується для гасіння пожежі, завдають значної шкоди й зовнішньому середовищу [13, 14]. Однак світова тенденція зростання частоти ПП та рівня збитків свідчать про те, що сучасні технології не повністю вирішують проблему забезпечення стійкого функціонування об’єктів та ефективного їх захисту від ПП [15]. Тому одним із важливих напрямів

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

забезпечення стійкого функціонування об'єктів на сучасному етапі слід вважати якісний їх захист від ПП. Відомо, що джерелом будь-якого ПП є поява загоряння (З) [16]. Це означає, що проблема якісного захисту об'єктів від ПП зводиться до раннього виявлення З та недопущення переходу З в великі пожежі зі збитками. Тому вирішення проблеми виявлення З (ВЗ) є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [17] зазначається, що раннє ВЗ можна здійснювати за рахунок використання нетрадиційних ознак та прогнозування структурних змін щодо небезпечних параметрів газового середовища (ГС) приміщень. Показано, що реальна динаміка небезпечних параметрів ГС як до, так і після З мають нелінійний та нестаціонарний характер. Це дає підстави щодо різних напрямків розв'язанні проблеми ВЗ. Перший напрямок пов'язаний із підвищенням якості ВЗ в умовах нестаціонарної змін небезпечних параметрів ГС. Наприклад, в умовах нестаціонарної зміни параметрів ГС пропонується використовувати швидкодію відомих методів ВЗ [18]. Однак такі методи обмежуються лише часовою областю та схемними рішеннями. При цьому частотна область щодо структурної зміни небезпечних параметрів ГС не розглядається, а схемні рішення обмежуються лише температурою ГС. У роботі [19] в умовах нестаціонарної зміни небезпечних параметрів ГС пропонується для ВЗ використовувати адаптивні методи. Однак методи [19] обмежуються адаптацією до нестаціонарних характеристик небезпечних параметрів ГС у часовій області лише другого порядку. Частотна область при цьому та властивості зміни небезпечних параметрів ГС вище другого порядку не досліджуються.

Другий напрямок пов'язаний із підвищенням якості ВЗ в умовах складного та нестаціонарного характеру змін небезпечних параметрів ГС. Так, у [20] пропонується використовувати групова обробка вимірювань безлічі датчиків з урахуванням реалізації мережевих технологій. Групова обробка вимірювань від безлічі датчиків щодо різних небезпечних параметрів ГС у складних та нестаціонарних умовах розглядається в [21]. Однак групова обробка обмежується змінами параметрів ГС у часовій області та традиційними характеристиками, що не дозволяють виявляти нелінійні властивості.

З огляду на важливість проблеми ВЗ горючих матеріалів (ГМ) з низьким темпом З третій напрям присвячений експериментальному вивченню особливостей зміни небезпечних параметрів ГС при З таких ГМ. У роботі [22] наведено результати дослідження зміни небезпечних параметрів ГС під час З деревини. Дослідження залежності швидкості зростання температури ГС від інтенсивності горіння деревини виконано в [23]. Однак дослідження обмежуються залежністю лише середньої швидкості зростання температури від середньої інтенсивності горіння. Результати аналогічних досліджень для органічного скла та кипариса наведено в [24]. При цьому в роботах [22–24] відсутні дослідження особливостей часових та спектральних характеристик другого та третього порядку щодо небезпечних параметрів, які здатні виявляти їх структурні зміни. З огляду на нелінійний та нестаціонарний характер поведінки реальних небезпечних параметрів ГС під час З ГМ, для вирішення проблеми ВЗ необхідне використання новітніх нетрадиційних підходів, що здатні виявляти такі складні зміни.

У зв'язку з цим, четвертий напрямок визначається низькою досліджень щодо можливості ВЗ на основі використання фрактальних характеристик змін небезпечних параметрів ГС. У роботі [25] досліджуються можливості використання міри кореляційної розмірності для вектора стану небезпечних параметрів ГС. Застосуванню методу рекурентних діаграм щодо змін концентрації СО для раннього ВЗ,

присвячено роботу [26]. У [27] досліджуються можливості ВЗ на основі прогнозування З щодо поточної рекурентності вектора стану небезпечних параметрів ГС. Дослідженню модифікації моделі прогнозування Брауна щодо раннього ВЗ присвячена робота [28]. Адаптивний метод визначення рекурентних діаграм в умовах невизначеності динаміки небезпечних параметрів ГС розглядається в [29]. Однак зазначені підходи та методи, незважаючи на їхню новизну та перспективність використання, щодо вирішення проблеми ВЗ, обмежуються розглядом тільки часової області. Спектральна область при цьому не розглядається. Розвиток кореляційного методу щодо ВЗ на основі обчислення поточної рекурентності станів ГС розглядається в [30]. Застосуванню методу структурної функції для ВЗ присвячено дослідження [31]. Використання функції невизначеності щодо вирішення проблеми ВЗ розглядається в роботі [32]. Однак слід відмітити, що результати досліджень [30–32] обмежуються розглядом лише часової області. При цьому частотна область зміни небезпечних параметрів ГС не розглядається, а спектральні особливості змін не досліджуються. Більшість відомих моделей зміни небезпечних параметрів ГС є детермінованими [33]. Стохастичні моделі зміни небезпечних параметрів ГС розглядаються в [34]. Однак у [33, 34] моделі є часовими. При цьому в [33] зазначається, що більшість моделей мають уточнюватися під час вогневих випробувань. Результати вогневих випробувань з урахуванням випадкового фактора розглядаються в [35]. Наголошується, що підвищення ефективності ВЗ у реальних умовах повинне здійснюватись на основі спільної зміни щодо концентрації СО та густини диму ГС. У [36] досліджуються взаємні зв’язки між різними небезпечними параметрами ГС. Однак дослідження обмежуються тільки оцінкою кореляцій, яка характеризує виключно лінійний зв’язок. При цьому характеристики порядку вище за другий у частотній області, що дають змогу виявляти нелінійні зв’язки, не досліджуються.

П’ятий напрям пов’язаний із можливостями ВЗ на основі особливостей зміни небезпечних параметрів ГС у частотній області. У роботі [37] досліджуються особливості миттєвих амплітудних та фазових спектрів зміни небезпечних параметрів ГС приміщень. Зазначається, що амплітудні спектри виявляються малоінформативними з точки зору ВЗ. Однак цей висновок стосується амплітудного спектра тільки другого порядку (традиційного). Такий спектр, як відомо, не здатний виявляти кореляційні зв’язки між відповідними частотними складовими, що виникають у разі нелінійної змін небезпечних параметрів ГС, що є характерними в реальних умовах. При цьому спектрі зміни небезпечних параметрів ГС порядку вище за другий, здатні виявляти нелінійні властивості, однак вони не розглядаються. У роботі [38] досліджуються особливості амплітудних спектрів щодо небезпечних параметрів ГС у модельної камері. При цьому підтверджено, що амплітудні спектри третього порядку дозволяють виявляти нелінійні зв’язки частотних складових у спектрах зміни небезпечних параметрів ГС. Зазначається, що виявлення нелінійних частотних зв’язків істотно залежить від енергії небезпечного параметра ГС, що вимірюється. Особливості бікогерентності, яка є інваріантною до енергії небезпечного параметра, при цьому не розглядається. Особливості зв’язків частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС на основі бікогерентності досліджуються в [39]. Однак особливості бікогерентності спектра виконано тільки для окремого випадку частотних триплетів, що визначаються частотою та їхніх других гармонік. Це суттєво

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

обмежує можливості використання результатів дослідження [39] щодо ВЗ. При цьому особливості зв'язків для довільної пари частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС щодо ВЗ залишилися не дослідженими.

Таким чином, реальні зміни небезпечних параметрів ГС є складними та нестаціонарними. Складність змін зумовлені різними нелінійними ефектами, що виникають у ГС під час З і є прихованими та невизначеними. Відомі результати дослідження особливостей зв'язку частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів ГС на основі бікогерентності виконані тільки для окремого виду частотних триплетів і тому не можуть вважатися повними щодо ВЗ. Тому важливою та невирішеною частиною проблеми ВЗ слід вважати відсутність даних про особливості середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін основних небезпечних параметрів ГС при З різних ГМ.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – визначити особливості середньої бікогерентності частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та виникнення загоряння. Результати цих досліджень можуть бути використані для раннього виявлення загорянь матеріалів у приміщеннях з метою недопущення в них виникнення пожежі.

Для досягнення мети роботи поставлено завдання:

– виконати теоретичне обґрунтування міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному обмеженому часовому інтервалі;

– експериментально вивчити особливості міри середньої бікогерентності частотних складових спектра змін для основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння для типових матеріалів загоряння.

4. Матеріали та методи дослідження

Матеріалами дослідження служили вимірювання небезпечних параметрів ГС у стельовій області модельної камери [33]. Вимірювання здійснювались дискретно у часі з інтервалом 0,1 с. Результати вимірювань зберігалися в пам'яті комп'ютера. Примусове З тестових ГМ (ТГМ) проводилося приблизно в дискретний момент t 200. Небезпечними параметрами ГС камери, що вимірювалися були температура, щільність диму та концентрація CO. Поточне вимірювання температури ГС здійснювалось датчиком ТПТ-4 (Україна) [40], густини диму – датчиком ИПД-3.2 (Україна) [41], а концентрації CO – датчиком Discovery (Швейцарія) [42]. В експерименті у якості тестових обрано типові для приміщень ГМ як спирт, папір, деревина та текстиль. Небезпечними параметрами ГС, що вимірювались були температура, щільність диму та концентрація CO.

Обраний метод дослідження базується на використанні методу обчислення перетворення Фур'є по дискретних вимірюваннях відповідних небезпечних параметрів ГС камери щодо двох однакових за тривалістю інтервалів часу, що визначалися 100 дискретними значеннями, та методу визначення бікогерентності обчислених відповідних Фур'є спектрах. При цьому перший інтервал визначався між 100-м та 200-м дискретним вимірюваннями і відповідав достовірній відсутності З. Другий інтервал обмежувався між 200-м та 300-м вимірюваннями і

включав момент початку примусового З ТГМ у модельній камері. Обчислення бікогерентності на зазначених інтервалах досліджувалися для кожного з ТГМ у такому порядку: спирт, папір, деревина та текстиль. Щодо відновлення вихідних умов для небезпечних параметрів ГС камері після З кожного з ТГМ проводилася природна вентиляція камери протягом 5 хв. Запропонована міра середньої бікогерентності небезпечних параметрів ГС на вказаних інтервалах обчислювалась шляхом усереднення по відповідним частотним складовим спектру модуля косинусу миттєвої бікогерентності. На основі обчислених значень міри середньої бікогерентності для двох вказаних інтервалів методом порівняння динаміки значень мір на цих інтервалах здійснювалось вивчення особливостей поведінки середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища приміщень при появі загорянь.

5. Результати вивчення середньої бікогерентності динаміки параметрів газового середовища при загорянні

5.1. Теоретичне обґрунтування міри середньої бікогерентності

Відомо, що спектри порядку, вищого за другий, зазвичай використовують для виявлення та ідентифікації нелінійних зв'язків між частотними складовими складних процесів [43]. В роботі [44] зазначається, що в загальному випадку спектри високого порядку є надійним інструментарієм щодо виявлення особливостей процесів, які відрізняються від Гаусу, з одночасним придушенням адитивних перешкод Гауса. Слід зазначити, що спектри порядку вище другого містять корисну інформацію щодо особливостей процесів в порівняні зі спектрами другого порядку [45, 46].

Оцінка біспектру B(h1, h2; T) для часового інтервалу T та дискретної на ньому множини {x(k)} значень досліджуваного процесу, дотримуючись [47], визначатиметься у вигляді:

$$B(h1,h2;T) = X(h1;T)X(h2;T)X^{*}(h1+h2;T), \qquad (1)$$

де B(h1,h2;T) – функція змінних h1, h2 для заданого інтервалу T; h1, h2 – частотні індекси, що відповідають частотам f1=h1/T та f2=h2/T; $X(h;T)=\sum_{k=0}^{N-1} x(k)\exp(-j2\pi hk/N)$, (0≤k≤N-1) – визначає перетворення Фур'є для дискретної множини {x(k)} та довільного частотного індексу h (0≤h≤N-1); * – оператор комплексного спряження. Величина T визначає тривалість інтервалу в секундах. При цьому інтервал і його тривалість повинні відповідати ділянці стаціонарності процесу. У разі невиконання цієї умови перетворення Фур'є в (1) визначатиметься з помилкою, величина якої залежатиме від ступеня нестаціонарної поведінки процесу на цьому інтервалі. Крім цього оцінка (1) є комплексною величиною [48]. Тому вона характеризується дійсною Re[B(h1,h2;T)] та мнимою Im[B(h1,h2;T)] частинами. Це означає, що замість оцінки (1) можна розглядати відповідні оцінки біспектру амплітуди та фази. Для інтервалу T фазовий біспектр φ(h1, h2; T) визначатиметься:

$$\varphi(h1,h2;T) = \operatorname{arctg}\{\operatorname{Im}[B(h1,h2;T)]/\operatorname{Re}[B(h1,h2;T)]\}. \qquad (2)$$

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

На відміну від біспектру амплітуди, (2) не залежить від енергії відрізка реалізації процесу на інтервалі тривалістю T і визначається нелінійною функцією від відношення мнимої та дійсною частини (1), що визначаються з приблизно однаковими похибками. Це дає змогу певною мірою знизити вплив зазначених помилок на визначення бікогерентності. Для додаткового зниження впливу похибок, слідуючи [39], пропонується замість (2) використовувати міру, що визначається у вигляді:

$$M(h1, h2; T) = \left|\cos[\varphi(h1, h2; T)]\right|. \quad (3)$$

У цьому разі значення міри бікогерентності (3) належатимуть фіксованому інтервалу: $-1 \le M(h1,h2;T) \le 1$. Крім того нелінійна функція косинуса у (2) дає змогу додатково згладити можливі похибки в області когерентності (2) (0 та π). При цьому міра (3), що дорівнює 1, відповідає повній когерентності трьох частот, що визначаються частотними індексами h1, h2 та h1+h2 у спектрі X(h;T). Якщо міра (3) дорівнює -1, то між зазначеними трьома частотами має місце також повна когерентність, але вона характеризується протилежним значенням (2), тобто рівним π. У разі міри (3), що дорівнює нулю, когерентність між зазначеними трьома частотами в спектрі X(h;T) відсутня. Проміжні значення міри (3) відповідатимуть різному ступеню когерентності зазначених трьох частот у спектрі X(h;T). При цьому абсолютне значення міри (3) для частотних індексів h1, h2, відмінне від нуля, вказуватиме на наявність відповідного ступеня когерентності для частотних індексів h1, h2 та h1+h2 у спектрі X(h;T). Ступінь бікогерентності визначає частку енергії процесу між будь-якою парою частот та їхньою сумарною частотою. При цьому точність міри (3) залежатиме від точності визначення спектра X(h;T), яка зі свого боку обернено пропорційна тривалості T часового інтервалу. Слідуючи [49], зі збільшенням тривалості інтервалу T точність оцінки спектра X(h;T) буде зростатиме. Крім цього, в [50] доводиться, що для великих за тривалістю T інтервалів (значень N) оцінки для дійсної та мнимої частин біспектру (1) виявляються асимптотичне незміщеними та спроможними. Важливою перевагою міри (3), порівняно з амплітудою біспектру (1), є її інваріантність до енергетичних параметрів відрізка реалізації процесу, її підвищена точність і застосовність до різних видів частотних триплетів. Це дає змогу за допомогою міри (3) досліджувати особливості когерентності спектральних складових X(h;T) для довільних видів частотних триплетів. Крім цього, міра (3) дає змогу для довільного небезпечного параметра ГС на заданому інтервалі визначати та візуально відображати ступінь бікогерентності частот спектру X(h;T). Візуальне відображення здійснюється у вигляді тривимірного графіка з двома взаємно ортогональними координатними осями, що визначаються заданими частотними індексами, та третьою взаємною ортогональною віссю, яка відповідає величині міри (3) для відповідної довільної пари частотних індексів. Однак таке візуальне відображення бікогерентності ускладнює його застосування на практиці. Тому актуальними є пропозиції щодо способів перетворення цього відображення в інші види, що зручніші для практичного застосування.

У [39] запропоновано один із можливих способів такого перетворення. Пропонований спосіб полягає в перетворенні (3) на міру M1(h1,h1;T). При цьому

пропонована міра є окремим випадком і залежить тільки від єдиного частотного індексу. Це дає змогу відображати величину бікогерентності тільки для одного довільного частотного індексу в спектрі X(h1;T). Тому зазначене перетворення міри (3) обмежується тільки визначенням величини бікогерентності між довільною частотою та її подвоєною частотою в спектрі досліджуваного процесу. Величину бікогерентності для довільної пари частот у спектрі ця міра не визначає. Тому пропонується міра, яка здатна визначати середню величину бікогерентності щодо вільної частоти з урахуванням усіх інших частот спектру досліджуваного процесу:

$$M2(h1;T) = \text{if}\,[h1 = 0, \frac{1}{h\,max+1}\sum_{i-0}^{h\,max} M(0,i;T), \frac{1}{h\,max+1}\sum_{i-0}^{h\,max} M(h1,i;T)], \qquad (4)$$

де h max – величина максимального частотного індексу в спектрі досліджуваного процесу, яка визначається за умови: $h\,max < hs$, где hs – максимальний частотний індекс у спектрі досліджуваного процесу. Міра (4) на відміну від [39] визначає середню величину бікогерентності для довільного частотного індексу з урахуванням усіх частот у спектрі, що відповідають частотним індексам від 0 до h max. Ця міра за рахунок усереднення по частотних індексах дає змогу додатково зменшити випадкові похибки. На основі міри (4) можна вивчати особливості середньої бікогерентності для довільного частотного індексу спектру небезпечного параметра ГС на довільних часових інтервалах. В цьому випадку необхідно визначити значення цієї міри щодо відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах, яки відповідають достовірній відсутності та наявності З ГМ.

Таким чином, міра (4) на відміну від відомих мір дає змогу вивчати особливості не тільки середньої бікогерентності власних частот у спектрі небезпечних параметрів ГС, а й середньої бікогерентності з урахуванням вкладу усіх частотних складових у спектрі. Інакше кажучи, міра (4) дає змогу враховувати внесок в когерентність кожної з частот усіх інших частотних складових досліджуваного спектру.

5.2. Вивчення особливостей міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів середовища при загораннях

Вивчення особливостей міри середньої бікогерентності (4) виконувалось для рівних за тривалістю Т інтервалів, що дорівнювали 100 дискретним вимірюванням відповідного небезпечного параметра ГС при достовірної відсутності та наявності З ТГМ у модельній камері. Експериментальну частину роботи і процедуру обробки експериментальних даних, отриманих у камері, докладно наведено у роботі [39]. Відмінність запропонованої процедури обробки експериментальних даних полягала в тому, що замість міри [39] під час експерименту обчислювалась міра (4). Слід зазначити, що міра (4) за заданої тривалості часового інтервалу залежить тільки від одного довільного частотного індексу h1 та визначає для цього частотного індексу середній ступінь бікогерентності з урахуванням внеску усіх частотних триплетів (вільних трьох частотних індексів) спектру небезпечних параметрів ГС. На рис. 1 наведено результати дослідження міри (4) для різних частотних індексів h1 та відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах достовірній відсутності та наявності З.

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

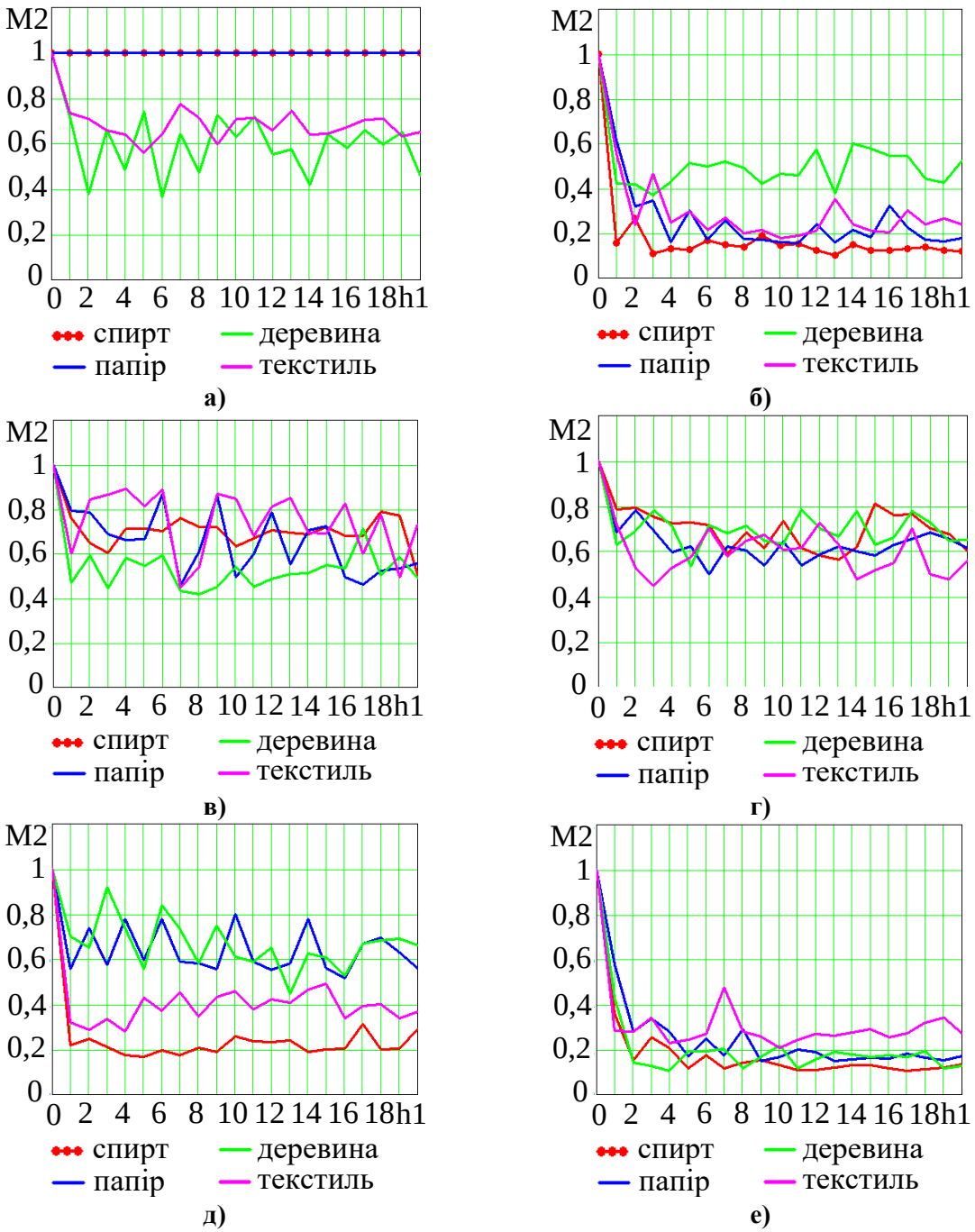


Рис. 1. Залежності середньої бікогерентності спектру зміни температури, густини диму та концентрації CO для різних значень частотного індексу h1 з урахуванням вкладу від усіх частотних триплетів на різних інтервалах: а, в, д – відсутність загоряння; б, г, е – наявність загоряння

Графіки на рис. 1 визначають ступінь середньої бікогерентності (4) для частот у спектрі щодо відповідних небезпечних параметрів ГС на інтервалах достовірної відсутності та наявності З ТГМ у модельній камері.

6. Обговорення результатів дослідження міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища

З аналізу результатів на рис. 1, випливає, що зміна температури, густини диму та концентрації CO ГС у модельній камері на інтервалах відсутності та наявності З спирту, паперу, деревини та текстилю є в цілому складним процесом, що характери-

зується різними середніми ступенями бікогерентності щодо частотних складових спектру. Це означає, що процес зміни зазначених параметрів ГС у камері зазвичай не є процесом Гауса, а має більш складний та нелінійний характер. Цей результат не суперечить відомим результатам і загалом збігається з ними. При цьому для кожного з розглянутих небезпечних параметрів ГС характер їх складної зміни виявляється неоднаковим та є суттєво індивідуальним. Це пояснюється різними прихованими механізмами, що відбуваються на молекулярному та макроскопічному рівнях та призводять до утворення спостережуваних змін розглянутих небезпечних параметрів ГС у камері при відсутності і наявності З ТГМ. При цьому при інтерпретації результатів слід враховувати, що значення міри (4), яки зосереджуються біля нульового значення відповідають відсутності когерентності третього порядку між відповідними частотними складовими у спектрі зміни небезпечного параметру. Разом з тим відомо, що у випадку процесу Гауса, когерентність третього порядку частотних складових буде дорівнювати нулю, що відповідає значенням міри (4) близьких до одиниці. Наприклад, різниця величини міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін температури ГС (рис. 1 а, б) при З ТГМ, свідчить про наявність неоднакового характерного зв'язку між відповідними частотними складовими. Це означає, що реальна зміна температури ГС в камері як на інтервалі відсутності, так і на інтервалі наявності З досліджуваних ТГМ має в цілому нелінійний характер. Характерні особливості розподілу величини міри середньої бікогерентності для частот спектру зміни температури можуть бути використані як можлива ознака щодо раннього виявлення З ТГМ. При цьому на інтервалі відсутності З ТГМ динаміка зміни температури ГС у камері характеризується також неоднаковим розподілом значень міри середньої бікогерентності щодо окремих частотних складових (рис. 1 а). Наприклад, усереднена по 20 частотних складових (в діапазоні частот 0-2 Гц) міра середньої бікогерентності лежить у межах від 0 до 1,0. При цьому характер зміни міри середньої бікогерентності по частотах є неоднаковим. Максимальне значення міри, що дорівнює 1,0 для усіх частотних індексів має місце перед З спирту та паперу. Перед З деревини та текстилю значення міри по частотним індексам мають випадковий характер з розкидом по частотах в межах від 0,4 до 0,8. Випадковість розподілу значень міри, на нашу думку, обумовлена недостатнім інтервалом часу природної вентиляції камери після З кожного з ТГМ. Зазвичай за цей час небезпечні параметри ГС камери не встигатимуть прийти в початковий стан. На це впливає також і різний набор утворення кожним з ТГМ небезпечних параметрів ГС. Тому можна стверджувати, що в ході експерименту початкові властивості ГС камери мали різний характер. При виконанні експериментального дослідження цей недолік розглядався як корисний. Наприклад, різниця величин міри середньої бікогерентності для частотних складових у спектрах зміни щільності диму та концентрації чадного газу ГС камери (рис. 1 в, д) при відсутності З ТГМ підтверджує це ствердження. З аналізу результатів, що наведені на рис. 1 б, г, е, встановлено, що наявність З ТГМ впливає на характер розподілу значень міри по різних частотних індексах для температури, щільності диму та чадного газу. Так, встановлено, що загальний вплив З ТГМ проявляється в появі тенденції зменшення значень міри для зростаючих частотних індексів. Наприклад, вказана тенденція володіє максимальною швидкістю для концентрації чадного газу, а мінімальною швидкістю щодо щільності при З усіх досліджуваних ТГМ. Це означає, що З ТГМ в цілому призводять до втрати початкових взаємозв'язків між частотними складовими і переходу динаміки небезпечних параметрів ГС зі стохастичними властивостями. Саме цей факт може розглядатися в якості ефективного приз-

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

наку щодо виявлення появи З у приміщеннях на основі використання запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів ГС.

Таким чином, експериментальне вивчення особливостей міри середньої бікогерентності досліджуваних небезпечних параметрів ГС в модельній камері при загорянні ТГМ за даними їх вимірювання можуть бути використані щодо виявлення З для недопущення виникнення пожежі зі втратами в приміщеннях різних типів об'єктів. Одержані результати свідчать про те, що динаміки небезпечних параметрів ГС в камері на інтервалах відсутності та наявності З ТМ в цілому відрізняються від Гауса та носять нелінійний характер. Це означає, що ефективне виявлення небезпечних змін у динаміці небезпечних параметрів ГС, що викликаються З матеріалів, потребує використання нових методів нелінійної динаміки. Наприклад, запропонована міра середньої бікогерентності щодо небезпечних параметрів ГС є представником таких методів. Однак використання запропонованої міри середньої бікогерентності для фіксованого інтервалу вимірювань не дозволяє визначити момент часу виникнення З, що є важливим для практики показником з точки зору недопущення пожежі та евакуації людей. При цьому момент З на основі міри середньої бікогерентності буде визначатися лише з точністю до часового положення вимірюваного інтервалу часу. Слід зазначити, що точність обчислення міри середньої бікогерентності залежатиме переважно від тривалості інтервалу та реалізованої частоти дискретизації вимірювань. Чим більша тривалість цього інтервалу, тим точніше обчислюється спектр Фур'є та бікогерентність відповідного небезпечного параметра ГС. Відмітимо, що у дослідженні інтервал вимірювання складав 100 дискретних значень небезпечного параметра з інтервалом 0,1 секунду. Це означає, що тривалість двох інтервалів дорівнювала 10 секундам. Для таких параметрів вимірювання момент виявлення З відбувається лише з точністю 10 секунд. При цьому роздільна частотна здатність становить 0,1 Гц. До обмежень дослідження можна віднести те, що результати одержані на основі експериментальних вимірів динаміки небезпечних параметрів ГС у модельній камері для обмеженого набору типів ГМ. Тому вони не є остаточними, а лише вказують головний напрямок та перспективність можливого подальшого розвитку цього дослідження. У зв'язку з цим отримані результати потребують додаткової перевірки вогневими випробуваннями в реальних умовах З матеріалів у приміщеннях об'єктів.

7. Висновки

1. Теоретично обґрунтовано міра середньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін довільних небезпечних параметрів газового середовища на вільному обмеженому часовому інтервалі. Запропонована міра дає змогу вивчати особливості середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища з урахуванням вкладу усіх частотних складових у спектрі. Інакше кажучи, така міра дає змогу враховувати внесок у когерентність для кожної з частот спектру усіх інших частот.

2. Експериментально вивчені особливості зміни значень міри середньої бікогерентності частотних складових спектра основних небезпечних параметрів газового середовища в модельній камері на інтервалах достовірної відсутності та наявності загоряння для типових матеріалів загоряння. Одержані результати свідчать про те, що динаміки небезпечних параметрів газового середовища в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь матеріалів в цілому відрізняються від Гауса та носять складний нелінійний характер. Встановлено, що різниця міри се-

редньої бікогерентності для частотних складових у спектрі змін небезпечних параметрів газового середовища при наявності та відсутності загорянь має неоднаковий характер зв'язку для відповідних частотних складових. Зазначено, що такі характерні особливості різниці величин міри середньої бікогерентності для частот можуть бути використані як можлива ознака щодо раннього виявлення загорянь. Встановлено, що максимальне значення міри, що дорівнює 1,0 для усіх частотних індексів має місце перед загоранням спирту та паперу. Перед загоранням деревини та текстилю значення міри по частотним індексам мають випадковий характер з розкидом по частотах в межах від 0,4 до 0,8. При цьому встановлено, що загальний вплив загоряння проявляється в появі тенденції зменшення міри для зростаючих частотних індексів. Така тенденція володіє максимальною швидкістю для концентрації чадного газу, а мінімальною до щільності диму при загорянні усіх досліджуваних матеріалів. Встановлено, що загоряння матеріалів призводять до втрати початкових взаємозв'язків третього порядку між частотними складовими та переходу до стохастичної динаміки небезпечних параметрів газового середовища. Така обставина дозволяє розглядати її в якості можливої ознаки щодо виявлення загорянь на основі запропонованої міри середньої бікогерентності небезпечних параметрів газового середовища у приміщеннях.

Литература

1. Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. EEJET. 2017. Vol. 1/10(85). P. 27–36. doi: 10.15587/1729-4061.2017.85847

2. 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. International Journal of Multiphysics. 2015. Vol. 9. № 1. P. 9–20. doi: 10.1260/1750-9548.9.1.9

3. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V. Conceptual approaches for development of informational and analytical expert system for assessing the NPP impact on the environment. Nuclear and Radiation Safety. 2018. Vol. 3(79). P. 56–65. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).09

4. Development of the method of frequencytemporal representation of fluctuations of gaseous medium parameters at fire / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Popov V., Semkiv O. // EEJET. 2018. Vol. 2/10(92). P. 44–49. doi: 10.15587/1729-4061.2018.125926

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

6. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Hurkovskyi V., Nikolaiev K., Yatsyshyn T., Dimitriieva D. Physical features of pollutants spread in the air during the emergency at NPPs. Nuclear and Radiation Safety. 2019. Vol. 4/84. P. 11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11

7. Vambol V., Vambol S., Kondratenko O., Koloskov V., Suchikova Y. Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2018. Vol. 87(2). P. 77–84. doi: 10.5604/01.3001.0012.2830

8. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A. Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. EEJET. 2018. Vol. 2/10(92). P. 38–43. doi:

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

10.15587/1729-4061.2018.127865

9. Otrosh Y., Danilin O., Zhuravskyi M. Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 123. № 01012. doi: 10.1051/e3sconf/201912301012

10. Ragimov S., Sobyna V., Vambol S., Vambol V., Feshchenko A., Zakora A., Strejekurov E., Shalomov V. Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. 2018. Vol. 91. № 1. P. 27–33. doi: 10.5604/01.3001.0012.9654

11. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Maksymenko N., Meleshchenko R., Bezuhla Yu., Hrachova I., Nesterenko R., Shumilova A. Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. EEJET. 2020. Vol. 4/10(106). P. 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2020.210059

12. Otrosh Yu., Semkiv O., Rybka E., Kovalov A. About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708. № 1. 012065. doi: 10.1088/1757-899x/708/1/012065

13. Vambol S., Vambol V., Kondratenko O., Suchikova Y., Hurenko O. Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arranging the system of pollutant neutralization. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3/10(87). P. 63–73. doi: 10.15587/1729-4061.2017.102314

14. Rybalova O., Artemiev S., Sarapina M., Tsymbal B., Bakhareva A., Shestopalov O., Filenko O. Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2/10(92). P. 4–17. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127829

15. World Fire Statistics. Center for Fire Statistics of CTIF. 2022. № 27. P. 65. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG.pdf

16. Kovalov A., Otrosh Y., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination method for strength characteristics of reinforcing steel by using thread cutting method after temperature influence. MSF. 2020. Vol. 1006. P. 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.179

17. Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions / Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Samoilov M., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Bezuhla Yu., Karpets K., Kochanov E. // Eastern-European Journal of Enterprise. 2021. Vol. 2/10(110). P. 43–50. doi: 10.15587/1729-4061.2021.226692

18. Andronov V., Pospelov B., Rybka E. Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. EEJET. 2017. Vol. 2/9(86). P. 32–37. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96694

19. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 5/9(89). P. 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2017.110092

20. Caixia C., Fuchun S., Xinquan Z. One Fire Detection Method Using Neural Networks. Tsinghua Science and Technology. 2011. Vol. 16. № 1. P. 31–35. doi: 10.1016/s1007-0214(11)70005-0

21. Ding Q., Peng Z., Liu T., Tong Q. Multi-Sensor Building Fire Alarm System with Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory. Algorithms. 2014. № 7. P. 523–537. doi: 10.3390/a7040523

22. Wu Y., Harada T. Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. Scientia Silvae Sinicae. 2004. № 40. P. 131–136.

23. Ji J., Yang L., Fan W. Experimental Study on Effects of Burning Behaviours of Materials Caused by External Heat Radiation. Journal of Combustion Science and Technology. 2003. № 9. P. 139.

24. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. Journal of Chongqing University. 2005. № 28. P. 122.

25. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Gornostal S. Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5/10(95). P. 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

26. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych, P. Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 3/9(93). P. 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2018.133127

27. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Biryukov I., Butenko T., Yashchenko O., Bezuhla Yu., Karpets K., Vasylchenko R. Short-term fire forecast based on air state gain recurrency and zero-order Brown model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 3/10(111). P. 27–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233606

28. Pospelov B., Rybka E., Krainiukov O., Yashchenko O., Bezuhla Y., Bielai S., Kochanov E., Hryshko S., Poltavski E., Nepsha O. Short-term forecast of fire in the premises based on modification of the Brown's zero-order model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 4/10(112). P. 52–58. doi: 10.15587/1729-4061.2021.238555

29. Pospelov B., Rybka E., Togobytska V., Meleshchenko R., Danchenko Yu. Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 4/10(100). P. 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

30. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Karpets K., Pirohov O., Semenyshyna I.,. Kapitan R, Promska A., Horbov O. Development of the correlation method for operative detection of recurrent states. Eastern-European Journal of Enterprise. 2019. Vol. 6/4 (102). P. 39–46. doi: 10.15587/1729-4061.2019.187252

31. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. (2020). Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. Eastern-European Journal of Enterprise. 6/10(108), 14–22. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218714

32. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Krainiukov O., Harbuz S., Bezuhla Yu., Morozov I., Kuruch A., Saliyenko O., Vasylchenko R. Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. Eastern-European Journal of Enterprise. 2020. Vol. 2/10(104). P. 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2020.200140

33. Floyd J., Forney G., Hostikka S., Korhonen T., McDermott R., McGrattan K. Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. National Institute of Standard and

Technology. 2013. Vol. 1. 1st ed.

34. Полстянкин Р. М. Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях. Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 38. С. 130–135. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

35. Heskestad G., Newman J. S. Fire Detection Using Cross-Correlations of Sensor Signals. Fire Safety J. 1992. Vol. 18. № 4. P. 355–374. doi: 10.1016/0379-7112(92)90024-7

36. Gottuk D. T., Wright M. T., Wong J. T., Pham H. V., Rose-Pehrsson S. L., Hart S., Hammond M., Williams F. W., Tatem P. A., Street T. T. Prototype Early Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results. NRL/MR/6180–02–8602, Naval Research Laboratory, 2002.

37. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Bezuhla Y., Liashevska O., Butenko T., Darmofal E., Hryshko S., Kozynska I., Bielashov Y. Empirical cumulative distribution function of the characteristic sign of the gas environment during fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4/10(118). P. 60–66. doi: 10.15587/1729-4061.2022.263194

38. Pospelov B., Rybka E., Savchenko A., Dashkovska O., Harbuz S., Naden E., Chornomaz I., Hryshko S., Nepsha O. Peculiarities of amplitude spectra of the third order for the early detection of indoor fires. EEJET. 2022. Vol. 5/10(119). P. 49–56. doi: 10.15587/1729-4061.2022.265781

39. Pospelov B., Bezuhla Y., Yashchenko O., Khalmuradov B., Petukhova O., Gornostal S., Kozar Y., Tishechkina K., Salamatina O., Ihnatenko Z. Revealing the features of the third order phase spectrum of the main dangerous parameters of the gas medium. EEJET. 2022. Vol. 6/10(120). P. 63–70. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268437

40. Паспорт. Сповіщувач пожежний тепловий точковий. Arton. с. 7. URL: https://ua.arton.com.ua/files/passports/%D0%A2%D0%9F%D0%A2-4_UA.pdf

41. Паспорт. Сповіщувач пожежний димовий точковий оптичний. Arton. с. 8. URL: https://ua.arton.com.ua/files/passports/spd-32_new_pas_ua.pdf

42. Optical/Heat Multisensor Detector. Discovery. 2019. Issue 1. p. 4. URL: https://www.nsc-hellas.gr/pdf/APOLLO/discovery/B02704-00%20Discovery%20Multisensor%20Heat-%20Optical.pdf

43. Saeed M., Alfatih S. Nonlinearity detection in hydraulic machines utilizing bispectral analysis. TJ Mechanical engineering and machinery. 2013. P. 13–21.

44. Yang B., Wang M., Zan T., Gao X., Gao P. Application of Bispectrum Diagonal Slice Feature Analysis in Tool Wear States Monitoring. Research Square. 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-775113/v1

45. Chua K. C., Chandran V., Acharya U. R., Lim C. M. Application of higher order statistics/spectra in biomedical signals-A review. Med. Eng. Phys. 2010. № 32. P. 679–689. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.009

46. Chua K. C., Chandran V., Acharya U. R., Lim C. M. Cardiac state diagnosis using higher order spectra of heart rate variability. J. Med. Eng. Technol. 2008. № 32. P. 145–155. doi: 10.1080/03091900601050862

47. Cui L., Xu H., Ge J., Cao M., Xu Y., Xu W., Sumarac D. Use of bispectrum analysis to inspect the non-linear dynamic characteristics of beam-type structures containing a breathing crack. Sensors. 2021. Vol. 21. 1177. doi: 10.3390/s21041177

48. Martín-Montero, A., Gutiérrez-Tobal, G. C., Kheirandish-Gozal, L., Jiménez-García, J., Álvarez, D., del Campo, F. Heart rate variability spectrum characteristics in children with sleep apnea. Pediatr. Res. 2021. № 89. P. 1771–1779. doi: 10.1038/s41390-020-01138-2

49. Max J. Principes generaus et methods classiques. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro. 1981. P. 311.

50. Mohankumar K. Implementation of an underwater target classifier using higher order spectral features. Cochin. 2015. URL: https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/5368/T-2396.pdf?sequence=1

B. Pospelov, *DSc, Professor, Chief Researcher of the Department*
E. Rybka, *DSc, Professor, Deputy Head of the Center – Head of the Department*
R. Meleschenko, *DSc, Professor, Associate Professor of the Department*
Y. Bezuhla, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
O. Yashchenko, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
P. Borodych, *Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF THE AVERAGE BIHOHERENTITY OF THE DYNAMICS OF THE PARAMETERS OF THE GAS ENVIRONMENT AT THE APPEARANCE OF FIRE

The object of the study is the dangerous parameters of the gas environment during the ignition of materials in the premises. The importance of such research is related to the possibility of using the average bicoherence measure to detect fires and prevent emergency situations due to fire. The measure of the average bicoherence of arbitrary dangerous parameters of the gas environment on a free time interval is substantiated. Experimentally studied features of the average bicoherence measure of the frequency components of the spectrum of the main dangerous parameters of the gas environment in the model chamber at the intervals of reliable absence and presence of ignition of typical ignition materials. The results show that the dynamics of the dangerous parameters of the gas environment in the chamber at the intervals of the absence and presence of fires has a complex non-linear nature. It was established that the difference in the average bicoherence measure for the frequency components in the spectrum of changes in the hazardous parameters of the gas environment in the presence and absence of fires has a different and individual character. It is noted that the individual characteristics of the average bicoherence measure can act as a possible sign for the detection of fires. It was found that the maximum value of the measure equal to 1.0 for all frequency indices occurs before the ignition of alcohol and paper. Before the ignition of wood and textiles, the values of the frequency index measures are random and range from 0.4 to 0.8. It was established that the ignition of materials leads to the loss of the initial third-order relationships between the frequency components in the spectra. This makes it possible to consider the specified loss of connections as a general sign of fire detection by calculating the proposed measure of average bicoherence of hazardous parameters of the gas environment in the premises.

Keywords: measure, average bicoherence, change of dangerous parameters, gas medium, ignition of material

References

1. Vambol, S., Vambol, V., Sychikova, Y., Deyneko, N. (2017). Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10(85)), 27–36. doi: 10.15587/1729-4061.2017.85847

2. 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

3. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V. et al. (2018). Conceptual Approaches for Development of Informational and Analytical Expert System for Assessing the NPP impact on the Environment. Nuclear and Radiation Safety, 3(79), 56–65. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).09

4. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Popov, V., Semkiv, O. (2018). Development of the method of frequencytemporal representation of fluctuations of gaseous

medium parameters at fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10 (92)), 44–49. doi: 10.15587/1729-4061.2018.125926

5. 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

6. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Hurkovskyi, V., Nikolaiev, K., Yatsyshyn T., Dimitriieva, D. (2019). Physical features of pollutants spread in the air during the emergency at NPPs. Nuclear and Radiation Safety, 4/84, 11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11

7. Vambol, V., Vambol, S., Kondratenko, O., Koloskov, V., Suchikova, Y. (2018). Substantiation of expedience of application of high-temperature utilization of used tires for liquefied methane production. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 87(2), 77–84. doi: 10.5604/01.3001.0012.2830

8. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finelydispersed water. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10 (92)), 38–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

9. Otrosh, Y., Rybka, Y., Danilin, O., Zhuravskyi, M. (2019). Assessment of the technical state and the possibility of its control for the further safe operation of building structures of mining facilities. E3S Web of Conferences, 123, 01012. doi: 10.1051/e3sconf/201912301012

10. Ragimov, S., Sobyna, V., Vambol, S., Vambol, V., Feshchenko, A., Zakora, A., Strejekurov, E., Shalomov, V. (2018). Physical modelling of changes in the energy impact on a worker taking into account high-temperature radiation. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 91, 1, 27–33. doi: 10.5604/01.3001.0012.9654

11. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Maksymenko, N., Meleshchenko, R. et al. (2020). Mathematical model of determining a risk to the human health along with the detection of hazardous states of urban atmosphere pollution based on measuring the current concentrations of pollutants. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10 (106)), 37–44. doi: 10.15587/1729-4061.2020.210059

12. Otrosh, Yu., Semkiv, O., Rybka, E., Kovalov, A. (2019). About need of calculations for the steel framework building in temperature influences conditions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708, 1, 012065. doi: 10.1088/1757-899x/708/1/012065

13. Vambol, S., Vambol, V., Kondratenko, O., Suchikova, Y., Hurenko, O. (2017). Assessment of improvement of ecological safety of power plants by arranging the system of pollutant neutralization. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/10(87), 63–73. doi: 10.15587/1729-4061.2017.102314

14. Rybalova, O., Artemiev, S., Sarapina, M., Tsymbal, B., Bakhareva, A., Shestopalov, O., Filenko, O. (2018). Development of methods for estimating the environmental risk of degradation of the surface water state. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10 (92)), 4–17. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127829

15. World Fire Statistics (2022), 27. CTIF, 65. Available at: https://www.ctif.org/sites/default/files/2022-08/CTIF_Report27_ESG.pdf

16. Kovalov, A., Otrosh, Y., Rybka, E., Kovalevska, T., Togobytska, V., Rolin, I.

(2020). Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. Materials Science Forum, 1006, 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.179

17. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Samoilov, M., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T., Bezuhla, Yu., Karpets, K., Kochanov, E. (2021). Development of the method of operational forecasting of fire in the premises of objects under real conditions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2/10(110), 43–50. doi: 10.15587/1729-4061.2021.226692

18. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E. (2017). Development of a method to improve the performance speed of maximal fire detectors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(9 (86)), 32–37. doi: 10.15587/1729-4061.2017.96694

19. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Research into dynamics of setting the threshold and a probability of ignition detection by self-adjusting fire detectors. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/9(89), 43–48. doi: 10.15587/1729-4061.2017.110092

20. Cheng, C., Sun, F., Zhou, X. (2011). One fire detection method using neural networks. Tsinghua Science and Technology, 16(1), 31–35. doi: 10.1016/s1007-0214(11)70005-0

21. Ding, Q., Peng, Z., Liu, T., Tong, Q. (2014). Multi-Sensor Building Fire Alarm System with Information Fusion Technology Based on D-S Evidence Theory. Algorithms, 7(4), 523–537. doi: 10.3390/a7040523

22. Wu, Y., Harada, T. (2004). Study on the Burning Behaviour of Plantation Wood. Scientia Silvae Sinicae, 40, 131–136.

23. Ji, J., Yang, L., Fan, W. (2003). Experimental Study on Effects of Burning Behaviours of Materials Caused by External Heat Radiation. Journal of Combustion Science and Technology, 9, 139.

24. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. Journal of Chongqing University, 28, 122.

25. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Gornostal, S. (2018). Analysis of correlation dimensionality of the state of a gas medium at early ignition of materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/10(95), 25–30. doi: 10.15587/1729-4061.2018.142995

26. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P. (2018). Studying the recurrent diagrams of carbon monoxide concentration at early ignitions in premises. Eastern-European Journal of Enterprise, 3/9(93), 34–40. doi: 10.15587/1729-4061.2018.133127

27. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Biryukov, I., Butenko, T., Yashchenko, O., Bezuhla, Yu., Karpets, K., Vasylchenko, R. (2021). Short-term fire forecast based on air state gain recurrency and zero-order Brown model. Eastern-European Journal of Enterprise, 3/10(111), 27–33. doi: 10.15587/1729-4061.2021.233606

28. Pospelov, B., Rybka, E., Krainiukov, O., Yashchenko, O., Bezuhla, Y., Bielai, S., Kochanov, E., Hryshko, S., Poltavski, E., Nepsha, O. (2021). Short-term forecast of fire in the premises based on modification of the Brown's zero-order model. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4/10(112), 52–58. doi: 10.15587/1729-4061.2021.238555

29. Pospelov, B., Rybka, E., Togobytska, V., Meleshchenko, R., Danchenko, Yu. (2019). Construction of the method for semi-adaptive threshold scaling transformation when computing recurrent plots. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

4/10(100), 22–29. doi: 10.15587/1729-4061.2019.176579

30. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Karpets, K., Pirohov, O., Semenyshyna, I., Kapitan, R, Promska, A., Horbov, O. (2019). Development of the correlation method for operative detection of recurrent states. Eastern-European Journal of Enterprise, 6/4(102), 39–46. doi: 10.15587/1729-4061.2019.187252

31. Sadkovyi, V., Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Krainiukov, O., Rud, A., Karpets, K., Bezuhla, Yu. (2020). Construction of a method for detecting arbitrary hazard pollutants in the atmospheric air based on the structural function of the current pollutant concentrations. Eastern-European Journal of Enterprise, 6/10(108), 14–22. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218714

32. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Krainiukov, O., Harbuz, S., Bezuhla, Y. et al. (2020). Use of uncertainty function for identification of hazardous states of atmospheric pollution vector. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2(10(104)), 6–12. doi: 10.15587/1729-4061.2020.200140

33. Floyd, J., Forney, G., Hostikka, S., Korhonen, T., McDermott, R., McGrattan, K. (2013). Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. Vol. 1. National Institute of Standard and Technology.

34. Polstiankin, R. M., Pospelov, B. B. (2015). Stochastic models of hazardous factors and parameters of a fire in the premises. Problemy pozharnoy bezopasnosti, 38, 130–135. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

35. Heskestad, G., Newman, J. S. (1992). Fire detection using cross-correlations of sensor signals. Fire Safety Journal, 18(4), 355–374. doi: 10.1016/0379-7112(92)90024-7

36. Gottuk, D. T., Wright, M. T., Wong, J. T., Pham, H. V., Rose-Pehrsson, S. L., Hart, S., Hammond, M., Williams, F. W., Tatem, P. A., Street, T. T. (2002). Prototype Early Warning Fire Detection Systems: Test Series 4 Results. NRL/MR/6180–02–8602, Naval Research Laboratory.

37. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Bezuhla, Y., Liashevska, O., Butenko, T., Darmofal, E., Hryshko, S., Kozynska, I., Bielashov, Y. (2022). Empirical cumulative distribution function of the characteristic sign of the gas environment during fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(10(118)), 60–66. doi: 10.15587/1729-4061.2022.263194

38. Pospelov, B., Rybka, E., Savchenko, A., Dashkovska, O., Harbuz, S., Naden, E. et al. (2022). Peculiarities of amplitude spectra of the third order for the early detection of indoor fires. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(10(119)), 49–56. doi: 10.15587/1729-4061.2022.265781

39. Pospelov, B., Bezuhla, Y., Yashchenko, O., Khalmuradov, B., Petukhova, O., Gornostal, S. et al. (2022). Revealing the features of the third order phase spectrum of the main dangerous parameters of the gas medium. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(10(120)), 63–70. doi: 10.15587/1729-4061.2022.268437

40. Pasport. Spovishchuvach pozhezhnyi teplovyi tochkovyi. Arton. Available at: https://ua.arton.com.ua/files/passports/%D0%A2%D0%9F%D0%A2-4_UA.pdf

41. Pasport. Spovishchuvach pozhezhnyi dymovyi tochkovyi optychnyi. Arton. Available at: https://ua.arton.com.ua/files/passports/spd-32_new_pas_ua.pdf

42. Optical/Heat Multisensor Detector (2019). Discovery. Available at: https://www.nsc-hellas.gr/pdf/APOLLO/discovery/B02704-00%20Discovery%20Multisensor%20Heat-%20Optical.pdf

43. Saeed, M., Alfatih, S. (2013). Nonlinearity detection in hydraulic machines

utilizing bispectral analysis. TJ Mechanical engineering and machinery, 13–21.

44. Yang, K., Zhang, R., Chen, S., Zhang, F., Yang, J., Zhang, X. (2015). Series Arc Fault Detection Algorithm Based on Autoregressive Bispectrum Analysis. Algorithms, 8, 929–950. doi: 10.3390/a8040929

45. Chua, K. C., Chandran, V., Acharya, U. R., Lim, C. M. (2010). Application of higher order statistics/spectra in biomedical signals – Areview. Medical Engineering & Physics, 32(7), 679–689. doi: 10.1016/j.medengphy.2010.04.009

46. Chua, K. C., Chandran, V., Acharya, U. R., Lim, C. M. (2008). Cardiac state diagnosis using higher order spectra of heart rate variability. Journal of Medical Engineering & Technology, 32(2), 145–155. doi: 10.1080/03091900601050862

47. Cui, L., Xu, H., Ge, J., Cao, M., Xu, Y., Xu, W., Sumarac, D. (2021). Use of Bispectrum Analysis to Inspect the Non-Linear Dynamic Characteristics of Beam-Type Structures Containing a Breathing Crack. Sensors, 21(1177). doi: 10.3390/s21041177

48. Martín-Montero, A., Gutiérrez-Tobal, G. C., Kheirandish-Gozal, L., Jiménez-García, J., Álvarez, D., del Campo, F. et al. (2020). Heart rate variability spectrum characteristics in children with sleep apnea. Pediatric Research, 89(7), 1771–1779. doi: 10.1038/s41390-020-01138-2

49. Max, J. (1981). Principes generaus et methods classiques. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro, 311.

50. Mohankumar, K. (2015). Implementation of an underwater target classifier using higher order spectral features. Cochin. Available at: https://dyuthi.cusat.ac.in/xmlui/bitstream/handle/purl/5368/T-2396.pdf?sequence=1

Надійшла до редколегії: 09.03.2024
Прийнята до друку: 17.04.2024

© Б. Б. Поспєлов, Є. О. Рибка, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла та ін.

УДК 621.395

А. Б. Фещенко, *к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4869-6428)*
О. В. Закора, *к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0001-9042-6838)*
В. О. Собина, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОПЕРАТИВНА ГОТОВНІСТЬ ТИПОВОГО ФРАГМЕНТУ ВІДОМЧОЇ ЦИФРОВОЇ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ

Досліджено імовірнісну модель типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яка враховує вплив структури резервування та експлуатаційних параметрів безвідмовності та ремонтопридатності його вузлів та каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності. Отримана й проаналізована імовірнісна модель коефіцієнту оперативної готовності типового фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі після відмов в умовах надзвичайної ситуації, установлений взаємозв'язок між коефіцієнтом оперативної готовності і експлуатаційними параметрами. Вказано, що потрібний коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту цифрової телекомунікаційної мережі досягається не тільки підвищенням надійності вузлів, а вибором структури резервування та режиму технічного обслуговування каналів передачі даних, які до цього невизначені, тому і робляться дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів для структур без резервування та з резервуванням каналів передачі даних методом статистичного математичного моделювання. Встановлено, що з метою досягнення потрібного коефіцієнта оперативної готовності при зниження вимог до надійності вузлів типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі достатньо застосовувати структурне роздільне як мінімум двократне резервування каналів передачі даних, при наявності трикратного резервування каналів передачі даних ефективність також не значно зростає. Дані досліджень корисні для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності при експлуатації та плануванні потрібного режиму технічного обслуговування вузлів і каналів передачі даних типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі в залежності від співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову під час експлуатації.

Ключові слова: цифрова телекомунікаційна мережа, надійність, коефіцієнт оперативної готовності, імовірність безвідмовної роботи

1. Вступ

В умовах воєнного стану часто виникають випадки знеструмлення електроживлення, пошкодження каналів передачі даних з необхідністю перезавантаження апаратури типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі (ВЦТМ) ДСНС. Ефективність її роботи доцільно визначати коефіцієнтом оперативної готовності, що є комплексним показником безвідмовності й відновлюваності та визначає імовірність того, що у момент підключення, або перезавантаження елементарний фрагмент виявиться у працездатному стані і надалі протягом роботи у піковому навантажені в умовах надзвичайної ситуації (НС).

Виходячи з цього, для попередження аварійних станів в роботі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі зростає потрібність розробки достовірних методів прогнозування значення його коефіцієнта оперативної готовності в умовах реагування та ліквідації наслідків надзвичайної ситуації, що обумовлює актуальність проблеми дослідження.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [1] наведено формальні методи аналізу безвідмовної роботи телекомунікаційної мережі. Розглядається класифікація відмов і перелік телекомунікаційної апаратури, підданої відмовам в умовах перенавантаження. Імовірнісна модель те-

лекомунікаційної мережі описується графом, надійності вершин, якого характеризувалися функцією розподілу відмов, для підтримки працездатності телекомунікаційної мережі пропонувався спосіб резервування каналів та вузлів, але прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту телекомунікаційної мережі в умовах надзвичайної ситуації не проводилось як у випадку без резервування, та і при його наявності.

У [2] запропонована модель гіпотетичної телекомунікаційної мережі у вигляді імовірнісного графа, у якому всі елементи описуються функціями розподілу й мають кінцеві значення коефіцієнтів готовності, але розробка методів прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагментів телекомунікаційної мережі не проводились.

У [3] в інтелектуальних мережах у якості показника для аналізу надійності був запропонований комплексний коефіцієнт працездатності, рівний добутку коефіцієнти готовності, живучості й перешкодозахищеності на основі аналізу розрахунків. якого встановлено що для підвищення рівня постійної готовності інтелектуальних мереж до практичного застосування потрібне скорочення витрат на проведення технічного обслуговування. Однак, імовірнісні моделі прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ не розроблялись.

У [4] для двополюсної мережі передачі даних між центром і пунктами зв'язку, описуваною випадковим графом з використанням блок-схем надійності розроблена методика знаходження ймовірності зв'язку для складних мережевих структур, імовірнісна модель з урахуванням експлуатаційних параметрів при резервуванні типових фрагментів телекомунікаційної мережі для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності не розглядалось.

У [5] проведена оцінка впливу відмов на доступність й мінімізацію часу простою пропущених дійсних викликів центру екстреного виклику телекомунікаційної мережі. При цьому оцінні розрахунки надійності елементарних фрагментів телекомунікаційних мереж і аналіз впливу експлуатаційних параметрів та введення резервування і прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ не проводилися.

У [6] наведений огляд методів моделювання й аналізу надійності мереж зв'язку за діаграми блоку надійності, згідно дереву розламу та ланцюгам Маркова. Однак, конкретних результатів моделювання впливу експлуатаційних параметрів та резервування на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ не доведено.

У [7, 8] представлені методи моделювання й аналізу надійності програмного забезпечення ВЦТМ, рекомендації з відновлення працездатності ВЦТМ після збоїв або перевантажень. Між тим розробка, аналіз впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ та його моделювання не проводились.

У [9] розроблена методика графоаналітичної оцінки надійності при експлуатації елементарних фрагментів стохастичної мережі. Можливості даної методики не передбачують прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ під час реагування і ліквідації наслідків НС.

У [10] розроблена імовірнісна модель типового фрагмента ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники безвідмовності та ремонтопридатності. Однак, дана модель не розвинута до рівня прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ.

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

У [11, 12] розроблені імовірнісна модель вузла, каналу передачі даних та елементарного фрагменту ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники структуру та кратність резервування, але не дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ.

У [13] розроблені імовірнісна модель вузла, каналу передачі даних та елементарного фрагменту ВЦТМ, яка ураховує експлуатаційні показники структуру та кратність резервування, але вона не дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ при застосуванні різноманітних структур резервування каналів передачі даних.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є недосконаліть існуючих імовірнісних моделей для прогнозування коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з урахуванням впливу структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів інтенсивності відмов і інтенсивності відновлення, отриманих за результатами експлуатації вузлів та каналів передачі даних, на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі при відсутності та наявності резервування.

3. Мета та завдання дослідження

Мета даної роботи полягає у розробці імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яка враховує вплив структури резервування та експлуатаційних параметрів безвідмовності і ремонтопридатності його вузлів і каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності.

Для досягнення мети роботи потрібно і вирішити наступні завдання:

- розробити імовірнісну модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням;
- виявити вплив структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є організація експлуатації вузлів та каналів передачі даних відомчої цифрової телекомунікаційної мережі та недопущення аварійних станів під час експлуатації в умовах воєнного стану під час ліквідації наслідків НС. Гіпотеза дослідження полягає в наявності статистичної залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від експлуатаційних показників і структур резервування каналів передачі даних різноманітної кратності резервування. В дослідженні при розробці імовірнісної моделі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі розглядаються припущення, що потоки відмов вузлів та каналів передачі даних типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі є найпростіші та обумовлені законом Пуассона або за моделлю Колмогорова. При математичному моделюванні коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі приймаються спрощення в прийнятті вузлів та каналів передачі даних рівнонадійними. Аналітичні дослідженні базуються на методах теорії надійності, а при експериментальних дослідженнях застосуванні методи статистичного моделювання за допомогою програмної системи математичних розрахунків MathCad 14 на базі апаратного забезпечення персо-

нального комп'ютера. Умови проведення експерименту відповідають реальним експлуатаційним показникам, процедури обробки експериментальних даних складаються з аналізу отриманих експериментальних графічних даних, а перевірка адекватності запропонованих моделей підтверджується проведенням одночасного порівняння результатів статистичного моделювання за двома вказаними вище статистичними припущеннями.

5. Розробка імовірнісної моделі типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням

Апаратура типового фрагменту ВЦТМ забезпечує обмін інформацією між посадовими особами відповідних пунктів управління (c, a, b) каналу передачі даних (ca, ab) має певну топологію й зв'язану фізичну структуру, тому імовірнісну модель коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів його елементів можливо представити на рис. 1.

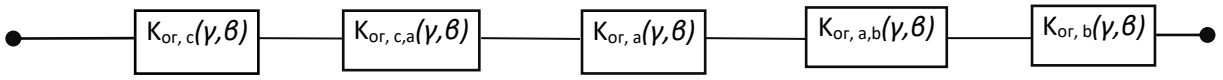


Рис. 1. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування

На рис. 1 кожному елементу схеми відповідають певні коефіцієнти оперативної готовності $K_{ог,\,c}(\gamma,\beta)$ – центрального вузла, $K_{ог,\,a}(\gamma,\beta)$ – вузла 1-го рівня (регіонального рівня), $K_{ог,\,b}(\gamma,\beta)$ – вузла 2-го рівня (районного рівня) та відповідних каналів передачі даних $K_{ог,\,c,a}(\gamma,\beta)$ і $K_{ог,\,a,b}(\gamma,\beta)$.

Виходячи зі структури типового фрагменту ВЦТМ без резервування рис. 1, при обліку надійності вершин c, a і b проведемо обчислення структурного коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ $K^{\oplus}_{ОГ,c,a}(\gamma\gamma\beta)$ за формулою:

$$K^{\oplus}_{ОГ,c,a,b}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ,c}(\gamma\gamma\beta)\cdot K_{ОГ,c,a}(\gamma\gamma\beta)\cdot K_{ОГ,a}(\gamma\gamma\beta)\cdot K_{ОГ,a,b}(\gamma\gamma\beta)\cdot K_{ОГ,b}(\gamma\gamma\beta), \quad (1)$$

де $K_{ОГ,c}(\gamma\gamma\beta)$, $K_{ОГ,a}(\gamma\gamma\beta)$, $K_{ОГ,b}(\gamma\gamma\beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності вузлів c, a, b типового фрагменту ВЦТМ;

$K_{ОГ,c,a}(\gamma\gamma\beta)$, $K_{ОГa,b}(\gamma\gamma\beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності каналів передачі даних типового фрагменту ВЦТМ.

Як відомо вираження для коефіцієнта оперативної готовності $K_{ог}(\gamma\gamma\beta)$ апаратури вузла (каналу передачі даних) типового фрагменту ВЦТМ в умовах відновлення і перезавантаження визначається наступним вираженням [12]:

$$K_{ог}(\gamma\gamma\beta) = K_{г}(\gamma\gamma\beta)\cdot P_0(\gamma\gamma\beta), \quad (2)$$

де $K_{г}(\gamma\gamma\beta) = \dfrac{1}{(1+\gamma)\cdot\left[1+\dfrac{\beta}{(1+\gamma)}\right]}$; $P_0(\gamma\gamma\beta)$ – коефіцієнт готовності, імовірність безвідмовної роботи апаратури вузла або каналу передачі даних ВЦТМ типового фрагменту ВЦТМ; $\gamma = \lambda\mu = T_в / T_о$ співвідношення інтенсивності відмов до інтенсивності

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

відновлення, саме як середнього часу відновлення $T_в$ елемента ВЦТМ, що відмовив, до часу наробітку на відмову $T_о$; $\beta = \lambda t = T_п / T_о$ – співвідношення типового періоду експлуатації $t=T_п$ (періоду профілактичних робіт, часу вимушеного простою РЕА вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ через відсутність необхідних елементів заміни в одиночному комплекті запасних технічних засобів (ОК ЗТЗ) або періоду поповнення ОК ЗТЗ до часу наробітку на відмову $T_о$.

Для оціночного розрахунку коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування приймемо, що його вузли та канали передачі даних рівнонадійні:

$$K_{ОГ,c}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ,c,a}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ,a}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ,a,b}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ,b}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta), \quad (3)$$

$$K_{ОГП}(\gamma\gamma\beta) = \frac{\exp(-\beta)}{(1+\gamma)\cdot\left[1+\frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]}$$

або

$$\text{де } K_{ОГК}(\gamma\gamma\beta) = \frac{\left\{1+\gamma\cdot\exp\left[-\frac{(\gamma+1)}{\gamma}\beta\right]\right\}}{(1+\gamma)^2\cdot\left[1+\frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]};$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta) = \{\ \}\{\ \}$$

$K_{ОГП}(\gamma\gamma\beta)$ – коефіцієнт оперативної готовності вузла (каналу передачі даних) за відмовами обумовленими законом Пуассона [13]; $K_{ОГК}(\gamma\gamma\beta)$ – коефіцієнт оперативної готовності вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ за відмовами обумовленими моделлю Колмогорова [13].

Тоді за відмовами обумовленими законом Пуассона (3) коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування $K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ прийме вид:

$$K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta) = \left[K_{ОГП}(\gamma\gamma\beta)\right]^5 = \frac{(\exp(-\beta))^5}{(1+\gamma)^5\cdot\left[1+\frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]^5}, \quad (4)$$

а за відмовами обумовленими, які описуються моделлю Колмогорова (3) $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ дорівнює:

$$K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta) = \left[K_{ОГК}(\gamma\gamma\beta)\right]^5 = \left\{\frac{\left\{1+\gamma\cdot\exp\left[-\frac{(\gamma+1)}{\gamma}\beta\right]\right\}}{(1+\gamma)^2\cdot\left[1+\frac{\beta}{(1+\gamma)}\right]}\right\}^5, \quad (5)$$

Однак, як що існують умови передачі даних у будь який час не тільки з використанням можливостей каналів передачі даних ДСНС, а ще й трафіку операторів телекомунікацій та ресурсів державних каналів передачі даних спеціального

призначення, то з точки зору надійності фрагменту ВЦТМ це еквівалентно роздільному резервуванню каналу передачі даних ДСНС хоча б одним або в повному обсязі двома резервними вказаними каналами передачі даних, що відповідно забезпечує кратність резервування $m_{к,роз}$=2, 3, тоді їх справний стан роботи визначається формулою (6), яка потім перетворюється до вигляду (7):

$$K_{ОГ_{с,а}}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ_{а,b}}(\gamma\gamma\beta) = \left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{m_{к,роз}}\right], \quad (6)$$

$$\begin{gathered}
\left[K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right]^{к,роз}, _при\ 1; \\
\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{2}\right]^{к,роз}, _при\ 2 \quad (7) \\
\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{3}\right]^{к,роз}, _при\ 3. \\
K_{ОГ_{с,а}}(\gamma\gamma\beta) = K_{ОГ_{а,b}}(\gamma\gamma\beta) = \{\ \}\{\ \}\{\ \}.
\end{gathered}$$

Як що розглядати це питання (6, 7) більш детально, то можна помітити, що кратність резервування каналів передачі даних з центрального вузла до вузла 1-го рівня (регіонального рівня) може відрізнятися для випадку передачі даних від вузла 1-го рівня (регіонального рівня) до вузла 2-го рівня (районного рівня), що враховується та описується формулою:

$$K_{ОГ_{с,а}}(\gamma\gamma\beta) = \left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{m_{к,с,а,роз}}\right],\ K_{ОГ_{а,b}}(\gamma\gamma\beta) = \left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{m_{к,а,b,роз}}\right], \quad (8)$$

де $m_{к,са,роз}$, $m_{к,ab,роз}$ – кратність роздільного резервування відповідних каналів передачі даних.

Тоді повинно врахувати залежності (8) при удосконаленні структурної схеми моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування (рис.1).

Так при наявності роздільного резервування каналів передачі даних з різноманітними комбінаціями кратностей резервування $m_{к,са,роз}$, $m_{к,ab,роз}$ структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ буде мати наступний вигляд (рис. 2).

Відмітимо, що де які комбінації $m_{к,са,роз}$,:$m_{к,ab,роз}$ на структурній схемі (рис. 2) не розглянуті, але враховані в (9), так комбінація $m_{к,са,роз}$:$m_{к,ab,роз}$ =1:2 еквівалентна комбінації 2:1, $m_{к,са,роз}$: $m_{к,ab,роз}$ =3:2 еквівалентна комбінації 2:3, а комбінації $m_{к,са,роз}$ $m_{к,ab,роз}$ =3:1 та $m_{к,са,роз}$:$m_{к,ab,роз}$ 1:3 еквівалентні між собою та рівні за сумарною кратністю ($m_{к,са,роз}$ +$m_{к,ab,роз}$ =4) з комбінацією 2:2 а тому можливо приблизно співпадають за коефіцієнтом оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ, але вірність останнього твердження як допоміжної гіпотези цікаво перевірити під час проведення математичного моделювання за імовірнісної моделі за формулами (3, 9).

З використанням рис. 2 та уточнення (6–8) з урахуванням (2–5) коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів, чому відповідає $m_{в,роз}$=1 й з резервуванням каналів передачі даних з різноманітними комбінаціями кратностей $m_{к,са,роз}$, $m_{к,ab,роз}$ буде мати вигляд:

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

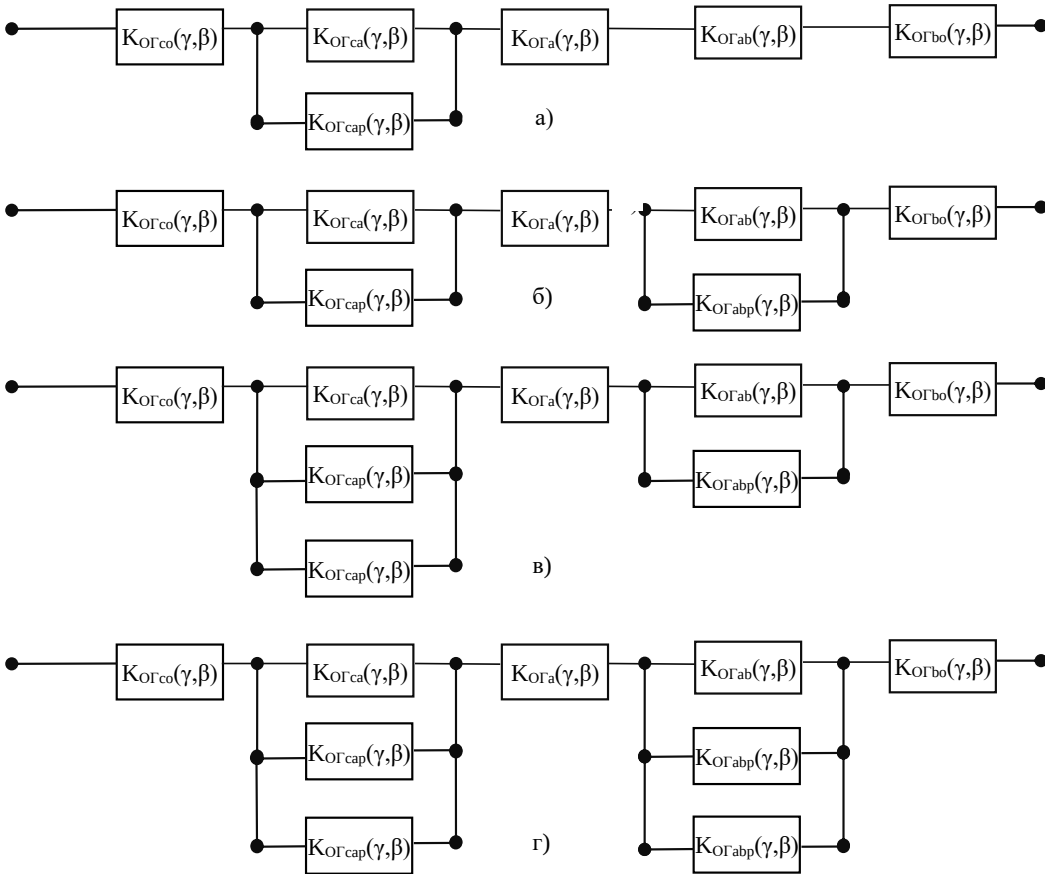


Рис. 2. Структурна схема моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ для структури з резервуванням каналів передачі даних: а – $m_{кэса,роз}=2$, $m_{кэаb,роз}=1$; б – $m_{кэса,роз}=2$, $m_{кэаb,роз}=2$; в – $m_{кэса,роз}=3$, $m_{кэаb,роз}=2$; г – $m_{кэса,роз}=3$, $m_{кэаb,роз}=3$

$$\text{в,роз}$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{5}_{\text{при}}1,_m_{\text{кса,роз}}=1,_m_{\text{кab,роз}}=1;$$

$$\text{кса,роз}$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{4}\cdot\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{2}\right]_{\text{при}}2,_m_{\text{кab,роз}}=1;$$

$$\text{кса,роз}$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{3}\cdot\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{2}\right]^{2}_{\text{при}}2,_m_{\text{кab,роз}}=2;$$

$$\text{кса,роз}$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{4}\cdot\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{3}\right]_{\text{при}}3,_m_{\text{кab,роз}}=1;$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{3}\cdot\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{3}\right].$$

$$\text{кса,роз}$$

$$\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{2}\right]_{\text{при}}3,_m_{\text{кab,роз}}=2;$$

$$\text{кса,роз}$$

$$K_{ОГ}(\gamma\gamma\beta)^{3}\cdot\left[1-\left(1-K_{ОГ_0}(\gamma\gamma\beta)\right)^{3}\right]^{2}_{\text{при}}3,_m_{\text{кab,роз}}=3. \qquad (9)$$

$$K^{\oplus}_{ОГ,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)=\{\ \}\{\ \}\{\ \}\{\ \}\{\ \}\{\ \}\{\ \}$$

де $K_{ОГ}(\gamma,\beta) = K_{ОГК}(\gamma,\beta)$ або $K_{ОГ}(\gamma,\beta) = K_{ОГП}(\gamma,\beta)$ – коефіцієнти оперативної готовності вузла або каналу передачі даних типового фрагменту ВЦТМ за відмовами обумовленими законом Пуассона або за моделлю Колмогорова (3).

Отримані вираження (3, 9) описує імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ (рис. 2), та дозволяє провести математичне моделювання з дослідження впливу нормованих експлуатаційних параметрів та структури резервування каналів передачі даних на його коефіцієнт оперативної готовності.

6. Дослідження коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі

На першому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування каналів передачі даних та вузлів від експлуатаційних параметрів за відмовами обумовленими законом Пуассона та моделлю Колмогорова за імовірнісною моделлю рис. 1 формули (3–5), результати представлені на рис. 3.

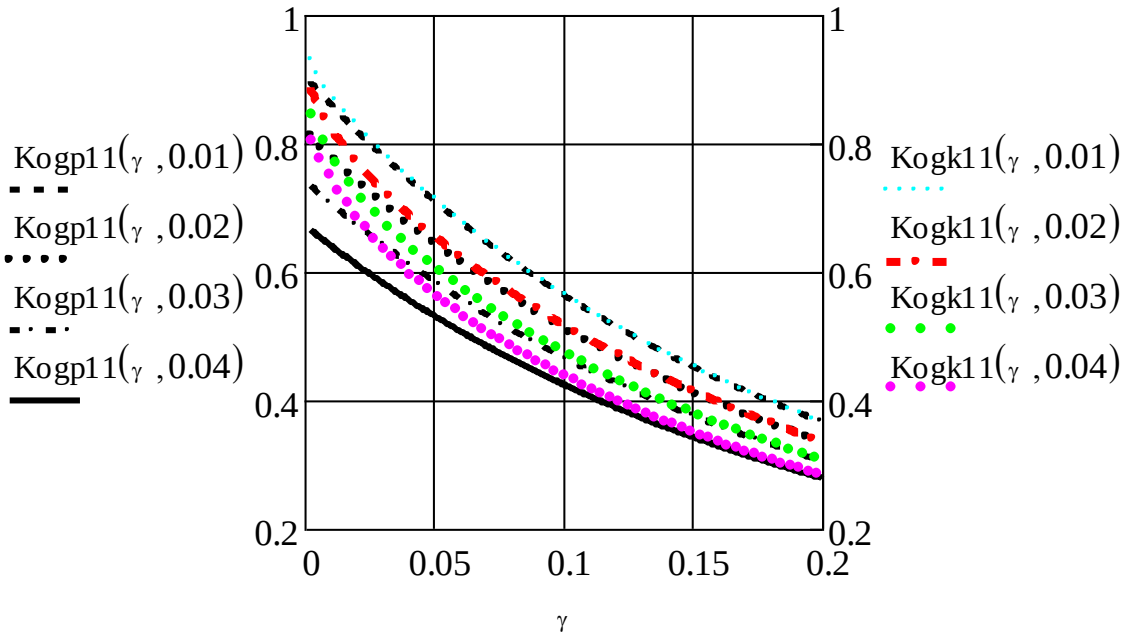


Рис. 3. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування від експлуатаційних параметрів γ, β

На другому етапі проведено математичне моделювання залежності коефіцієнту оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та з резервуванням каналів передачі даних від експлуатаційних параметрів за допомогою обраної імовірнісної моделі ВЦТМ (рис. 1, 2) вираження (3, 9). Результати математичного моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування $m_{к,са,роз}=m_{к,ab,роз}=1$ та при наявності резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей $m_{к,са,роз}:m_{к,ab,роз}=2:1;\ 2:2;\ 3:1$ представлені на рис. 4.

На рис. 5 представлені результати математичного моделювання залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування $m_{к,са,роз}=m_{к,ab,роз}=1$ та при наявності резервування каналів передачі даних з співвідношенням кратностей $m_{к,са,роз}:m_{к,ab,роз}=3:1;\ 2:2;\ 3:2;\ 3:3$.

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

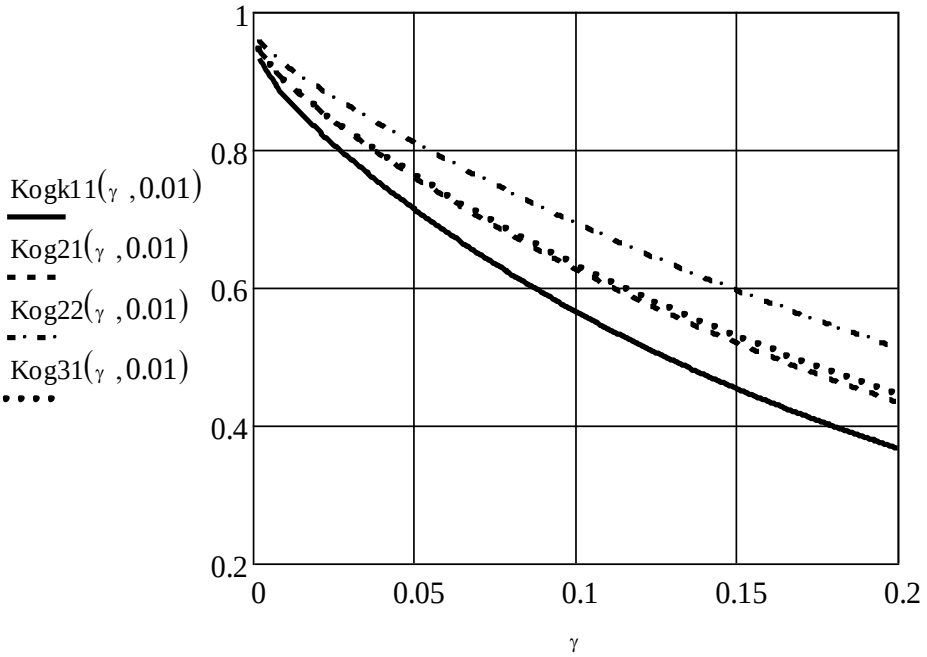


Рис. 4. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування $m_{кэса,роз}=m_{кэаb,роз}=1$ та при резервуванні каналів передачі даних $m_{кэса,роз}:m_{кэаb,роз}=2:1; 2:2; 3:1$

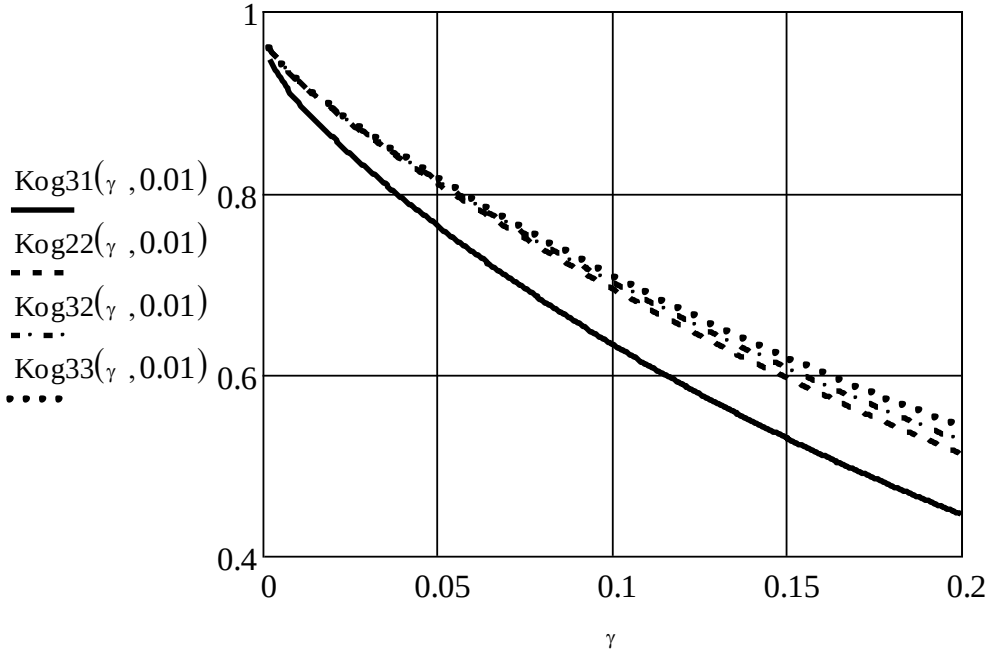


Рис. 5. Залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ від експлуатаційних параметрів без резервування $m_{кэса,роз}=m_{кэаb,роз}=1$ та при резервуванні каналів передачі даних $m_{кэса,роз}:m_{кэаb,роз}=3:1; 2:2; 3:2; 3:3$

7. Обговорення результатів математичного моделювання коефіцієнта оперативної готовності фрагменту телекомунікаційної мережі

Отримані результати пояснюються проведеним мета аналізом, де встановлена невирішена частина проблеми, на основі якої в розділі 3 поставлені мета і відповідні завдання дослідження. Особливості запропонованого в роботі методу і отриманих результатів в порівнянні з існуючими полягають в поєднанні синтезу і аналізу імовірнісної моделі зі статистичним моделюванням коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ при обраної послідовності проведення досліджень,

для вирішення мети роботи розподіленої на три етапи: обрання структурної схеми та імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування та з роздільним резервуванням каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів; математичне моделювання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та експлуатаційних параметрів; аналітичне порівняння результатів математичного моделювання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування, в залежності від структури та співвідношення кратностей резервування та експлуатаційних параметрів.

На першому етапі досліджень в роботі спочатку при урахуванні коефіцієнтів оперативної готовності вузлів (каналів передачі даних) була розроблена структурна схема імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів (рис. 2) та отримані порівняльні залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування для відмов обумовленими законом Пуассона (3) $K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ (4) та за моделлю Колмогорова (3) $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ (5) що підтверджує адекватність обраних моделей і є перевагами даного дослідження в порівнянні з аналогічними відомими.

Надалі на другому етапі була розроблена блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням каналів передачі даних (рис. 2) з урахуванням впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності. На основі розробленої блок-схеми надійності (рис. 2) виведена математична формула (9), яка описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ з роздільним резервуванням каналів передачі даних та застосовується для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності $K^{\oplus}_{ОГ,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$.

На першому етапі на рис. 3 наведені результати математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ для моделі відмов обумовленими законом Пуассона (4) та за моделлю Колмогорова (5).

На рис. 3 по первинної осі ординат ліворуч відкладені розрахункові значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ за статистикою відмов за законом Пуассона $K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$, а по вторинної осі праворуч за моделлю Колмогорова $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ для чотирьох значень нормованого експлуатаційного параметра β=0,01; 0,02; 0,03; 0,04, параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень γ=0,005÷0,2.

На другому етапі на рис. 4, 5 наведені порівняльні результати математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ без резервування та з резервуванням.

На рис. 4 по осі ординат відкладені розрахункові значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ для значення нормованого експлуатаційного параметра β=0,01, та при резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей $m_{к,са,роз}:m_{к,ab,роз}$=2:1; 2:2; 3:1, Ф параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень γ=0,005÷0,2.

На рис. 5 по осі ординат відкладені розрахункові значення коефіцієнта опе-

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

ративної готовності типового фрагмента ВЦТМ з резервування $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ для значення нормованого експлуатаційного параметра β=0,01, та при резервуванні каналів передачі даних з співвідношенням кратностей $m_{к,са,роз}:m_{к,ab,роз}$=3:1; 2:2; 3:2; 3:3, параметр γ по осі абсцис змінюється в інтервалі значень γ=0,005÷0,2.

На рис. 3 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ $K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$, $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ практично не відрізняються один від одного, знаходяться у межах 0,3÷0,9, та зменшуються при підвищенні нормованого параметра γ. Графіки функції $K^{\oplus}_{ОГП,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$, $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ з підвищенням нормованого експлуатаційного параметра β по осі ординат зміщаються вниз.

На рис. 4 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ без резервування $K^{\oplus}_{ОГК,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ в порівнянні з резервуванням каналів передачі даних для від нормованих експлуатаційних параметрів, знаходяться у межах 0,38÷0,98 при експлуатаційному параметрі β=0,01 зменшуються при підвищенні нормованого параметра γ=0,005÷0,2.

На рис. 5 значення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента ВЦТМ з резервуванням $K^{\oplus}_{ОГКР,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$ від нормованих експлуатаційних параметрів, находяться у межах 0,45÷0,99 при експлуатаційному параметрі β=0,01, та зменшуються при підвищенні нормованого параметра γ=0,005÷0,2. При цьому, як свідчать результати моделювання на рис. 5 потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента $K^{\oplus}_{ОГКР,c,a,b}(\gamma\gamma\beta)$=0,8÷0,99 при значеннях нормованого експлуатаційного параметра β=0,01 досягається тільки при γ<0,005.

Основними позитивними рисами отриманих результатів досліджень є застосування наочної і зручної форми опису мережевого коефіцієнта оперативної готовності на основі використанням методу блок-схем надійності з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів вузлів (каналів передачі даних) типового фрагменту ВЦТМ.

Але, все ж таки цим дослідженням притаманні обмеження пов’язані з відсутністю у автора можливості проведення фізичного експерименту реєстрування справних станів в роботі типового фрагменту ВЦТМ для розрахунку коефіцієнта оперативної готовності при включенні або перезавантаженні, та ще зі зміною структури резервування, тому в роботі застосований метод математичного статистичного моделювання зі спрощенням при допущенні, що усі вузли та канали передачі даних типового фрагменту ВЦТМ є рівнонадійні.

До недоліків даного дослідження можуть бути визначені відсутність дослідження урахування ієрархічності структури ВЦТМ у складі центрального, регіонального та районного вузлів, що може бути пов’язане труднощами з якими можна зіткнутися при математичного синтезу та аналізу коефіцієнта оперативної готовності одночасно для різноманітних структур резервування як вузлів, так і відповідних каналів передачі даних.

Тому, за умови подолання вказаних труднощів, коло застосування представленої методики може бути поширено для подальшого дослідження коефіцієнта оперативної готовності типових фрагментів в залежності від резервуванні вузлів в ієрархічної структурі ВЦТМ, в склад якої входять вже досліджені на коефіцієнт оперативної готовності резервовані канали передачі даних типового фрагменту ВЦТМ.

8. Висновки

1. Розроблена імовірнісна модель типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі з резервуванням. Підтверджена доцільність та зручність дослідження структури відомчої цифрової телекомунікаційної мережі як сукупності елементарних фрагментів, представлених у вигляді структурної схеми надійності без резервування, яка складається з трьох вузлів, послідовно з'єднаних відповідними каналами передачі даних. Розроблена структурна схема імовірнісної моделі коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування вузлів та каналів передачі даних в залежності від експлуатаційних параметрів на основі якої отримані залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту ВЦТМ без резервування для відмов обумовленими законом Пуассона та за моделлю Колмогорова. Складені блок-схеми надійності типового фрагменту ВЦТМ з резервуванням каналів передачі даних з урахуванням впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності, на основі яких виведені математичні формули, яка описують імовірнісну модель типового фрагмента ВЦТМ з роздільним резервуванням каналів передачі даних та застосовується для математичного моделювання впливу експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності. Розроблена імовірнісна модель дозволяє прогнозувати коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі з роздільним резервуванням каналами передачі даних з урахуванням нормованих експлуатаційних параметрів в умовах реагування і ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.

2. Досліджено вплив структури резервування каналів передачі даних та експлуатаційних параметрів на коефіцієнт оперативної готовності типового фрагмента цифрової телекомунікаційної мережі. Проведене статистичне математичне моделювання з дослідження залежності коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі від нормованих експлуатаційних параметрів вузлів (каналів передачі даних) без резервування та при роздільному резервуванні каналами передачі даних у складі типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі, яке показує. що імовірність справного стану її типового фрагменту без резервування знаходиться у межах від 0,3÷0,9, та підвищується при резервуванні каналами передачі даних де значеннях коефіцієнта оперативної готовності типового фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі складає приблизно інтервал від 0,4÷0,98. Потрібний рівень коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі $К_{ОГВЦТМ}$=0,8–0,99 досягається при значеннях нормованого експлуатаційного параметра $\beta<0,005$, тільки при використанні резервування каналів передачі даних, Для підтримання коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної на високому рівні при технічного обслуговуванні доцільно зменшувати нормований експлуатаційний параметр β, тобто зменшувати співвідношення період профілактичних робіт $Т_п$ до часу наробітку на відмову $Т_о$. Поставлена автором в ході дослідження допоміжна гіпотеза, що випадки резервування каналів передачі даних з кратністю ($m_{к,са,роз}$:$m_{к,ab,роз}$ =1:3; 3:1) та з комбінацією 2:2 приблизно співпадають за коефіцієнтом оперативної готовності типового фрагменту відомчої телекомунікаційної мережі, оскільки вони рівні за сумарною кратністю ($m_{к,са,роз}$ +$m_{к,ab,роз}$ =4) під час проведення математичного моделювання за імовірнісною моделлю типового фрагмента відомчої теле-

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

комунікаційної мережі (3, 9) не підтвердилась. Насправді, як бачимо на рис. 4, 5 резервування з співвідношенням кратності моделювання $m_{к,са,роз}:m_{к,ab,роз}=2:2$; за значенням коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі суттєво більш ефективне ніж при комбінаціях 3:1; 1:3, та незначно поступає випадку коли забезпечуються резервування каналів передачі даних з комбінаціями 3:2; 2:3; 3:3.

Таким чином, для підвищення коефіцієнта оперативної готовності типового фрагмента відомчої телекомунікаційної мережі рекомендовано на етапі експлуатації використовувати, як мінімум, дублювання каналів передачі даних, а під час експлуатації при технічному обслуговуванні доцільно зменшувати співвідношення періоду профілактичних робіт до часу наробітку на відмову.

Література

1. Qadir J., Hasan O. Applying formal methods to networking: Theory, techniques, and applications, Communications Surveys & Tutorials. 2015. Vol. 17(1). P. 256–291. doi: 10.1109/COMST.2014.2345792

2. Bistouni F., Jahanshahi M. Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability, Journal of Parallel and Distributed Computing. 2015. Vol. 75. P. 168–183. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.08.005

3. Wäfler J., Heegaard P. E. A combined structural and dynamic modelling approach for dependability analysis in smart grid, in: ACM Symposium on Applied Computing, ACM. 2013. P. 660–665. doi: 10.1145/2480362.2480489

4. Bistouni F., Jahanshahi M. Analyzing the reliability of shuffle-exchange networks using reliability block diagrams, Reliability Engineering & System Safety. 2014. Vol. 132. P. 97–106. doi: 10.1016/j.ress.2014.07.012

5. Marcus A. de Q.V. Lima, Paulo R.M. Maciel, Bruno Silva, Almir P. Guimarães. Performability evaluation of emergency call center, Performance Evaluation. 2014. Vol. 80. P. 27–42. doi: 10.1016/j.peva.2014.07.023

6. Ahmed W., Hasan O., Pervez U., Qadir J. Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks, Journal of Network and Computer Applications. 2017. Vol. 78. P. 191–215. doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.008

7. Todinov M. T. Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks, Book, Oxford Brookes University, Oxford, UK, 2013. 320 p. URL: https://www.amazon.com/Flow-Networks-Optimization-Repairable-Reliability-ebook/dp/B00BBTIXUI

8. Sedaghatbaf A., Abdollahi Azgomi M. A method for dependability evaluation of software architectures. Computing. 2018. Vol. 100. P. 119–150. doi: 10.1007/s00607-017-0568-3

9. Maza S. Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability. 2014. Vol. 228(3). P. 243–253. doi: 10.1177/1748006X14525772

10. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі елементарного фрагмента відомчої інформаційно-телекомунікаційної мережі. Problems of Emergency Situations. 2020. Вип. № 1(31). С. 34–43. URL: https://zenodo.org/badge/DOI/10.5281/zenodo.3901945.svg

11. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Розробка імовірнісної моделі

типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. Вип. № 1(33). С. 222–233. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

12. Фещенко А. Б., Закора О. В., Борисова Л. В. Удосконалення імовірнісної моделі типового фрагмента відомчої цифрової телекомунікаційної мережі ДСНС. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. Вип. № 1(35). С. 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

13. Фещенко А. Б., Закора О. В., Морщ Є. В. Оперативна готовність елементарного фрагменту відомчої цифрової телекомунікаційної мережі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Вип. № 1(37). С. 44–56. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-4

A. Feshchenko, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
O. Zakora, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*
V. Sobyna, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine

OPERATIONAL READINESS OF A TYPICAL FRAGMENT OF THE DEPARTMENTAL DIGITAL TELECOMMUNICATION NETWORK

A probabilistic model of a typical fragment of a departmental digital telecommunications network, which takes into account the influence of the redundancy structure and operational parameters of failure and maintainability of its nodes and data transmission channels on its operational readiness ratio, was studied. A probabilistic model of the coefficient of operational readiness of a typical fragment of a digital telecommunication network after failures in an emergency situation was obtained and analyzed, and the relationship between the coefficient of operational readiness and operational parameters was established. It is indicated that the required coefficient of operational availability of a typical fragment of a digital telecommunications network is achieved not only by increasing the reliability of nodes, but also by choosing a structure of redundancy and a mode of maintenance of data transmission channels, which are not yet defined, that is why research is carried out on the dependence of the coefficient of operational readiness of a typical fragment of a departmental telecommunications network on normalized operational parameters for structures without redundancy and with redundancy of data transmission channels by the method of statistical mathematical modeling. It has been established that in order to achieve the required operational readiness ratio while reducing the requirements for the reliability of nodes of a typical fragment of a departmental digital telecommunications network, it is sufficient to apply structurally separate at least two-fold redundancy of data transmission channels, in the presence of triple redundancy of data transmission channels, the efficiency also does not increase significantly. Research data are useful for predicting the operational readiness ratio during operation and planning the required maintenance regime for nodes and data transmission channels of a typical fragment of the departmental telecommunications network, depending on the ratio of the period of preventive work to the recovery time for failure during operation.

Keywords: digital telecommunication network, reliability, operational availability ratio, probability of failure-free operation

References

1. Qadir, J., Hasan, O. (2015). Applying formal methods to networking: Theory, techniques, and applications. Communications Surveys & Tutorials, 17(1), 256–291. doi: 10.1109/COMST.2014.2345792

2. Bistouni, F., Jahanshahi, M. (2015). Pars network: a multistage interconnection network with fault-tolerance capability. Journal of Parallel and Distributed Computing, 75, 168–183. doi: 10.1016/j.jpdc.2014.08.005

3. Wäfler, J., Heegaard, P. E. (2013). A combined structural and dynamic modelling approach for dependability analysis in smart grid, in: ACM Symposium on

© А. Б. Фещенко, О. В. Закора, В. О. Собина

Applied Computing, ACM, 660–665. doi: 10.1145/2480362.2480489

4. Bistouni, F., Jahanshahi, M. (2014). Analyzing the reliability of shuffleexchange networks using reliability block diagrams, Reliability Engineering & System Safety, 132, 97–106. doi: 10.1016/j.ress.2014.07.012

5. Marcus, A., de Q., V., Lima, Paulo, R., M., Bruno M., Silva, Almir, P., Guimarães. (2014). Performability evaluation of emergency call center, Performance Evaluation, 80, 27–42. doi: 10.1016/j.peva.2014.07.023

6. Ahmed, W., Hasan, O., Pervez U., Qadir, J. (2016). Reliability Modeling and Analysis of Communication Networks, Journal of Network and Computer Applications, 78, 191–215. doi: 10.1016/j.jnca.2016.11.008

7. Todinov, M. (2013). Flow Networks. Analysis and Optimization of Repairable Flow Networks, Networks with Disturbed Flows, Static Flow Networks and Reliability Networks, Book, Oxford Brookes University, Oxford, UK, 320. Available at: https://www.amazon.com/Flow-Networks-Optimization-Repairable-Reliability-ebook/dp/B00BBTIXUI

8. Sedaghatbaf, A., Abdollahi Azgomi, M. (2018) A method for dependability evaluation of software architectures. Computing, 100, 119–150. doi: 10.1007/s00607-017-0568-3

9. Maza, S. (2014). Stochastic activity networks for performance evaluation of fault-tolerant systems, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 228(3), 243–253. doi: 10.1177/1748006X14525772

10. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L., (2020). Rozrobka imovirnisnoyi modeli elementarnoho frahmenta vidomchoyi informatsiyno-telekomunikatsiynoyi merezhi. Problems of Emergency Situations, 1(31), 34–43. Available at: http://pes.nuczu.edu.ua/images/arhiv/31/3.pdf

11. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L. (2021). Rozrobka imovirnisnoyi modeli typovoho frahmenta vidomchoyi tsyfrovoyi telekomunikatsiynoyi merezhi DSNS. Problems of Emergency Situations, 1(33), 222–233. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-17

12. Feshchenko, A., Zakora, O., Borysova, L. (2022). Udoskonalennia imovirnisnoi modeli typovoho frahmenta vidomchoi tsyfrovoi telekomunikatsiinoi merezhi DSNS. DSNS. Problems of Emergency Situations, 1(35), 120–132. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-9

13. Feshchenko, A., Zakora, O., Morshch Ye. V. Operatyvna hotovnist elementarnoho frahmentu vidomchoi tsyfrovoi telekomunikatsiinoi merezhi. DSNS. Problems of Emergency Situations, 1(37), 44–56. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-4

Надійшла до редколегії: 07.03.2024
Прийнята до друку: 15.04.2024

УДК 614.84

***О. М. Роянов*[1]**, *к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000–0001–7631–1030)*
***А. М. Катунін*[1]**, *к.т.н., с.н.с., доц. каф. (ORCID 0000–0003–2171–4558)*
***О. В. Кулаков*[1]**, *к.т.н., доцент, с.н.с. наук. відділу (ORCID 0000–0001–5236–1949)*
***О. І. Богатов*[2]**, *к.т.н., доцент, зав. каф. (ORCID 0000–0001–7342–7556)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна*

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ НА ВИБУХОПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКУ ПРИМІЩЕНЬ З ГОРЮЧИМ ПИЛОМ

Здійснено оцінку розрахункового тиску вибуху пилоповітряної суміші у виробничому приміщенні з урахуванням вологості повітря для визначення категорії приміщення за вибухопожежонебезпекою. В дослідженні представлені дані, які демонструють наявність водяної пари в повітрі та відображають її чутливість до температури навколишнього середовища. Під час досліджень було проведено розрахунок надлишкового тиску вибуху у робочому приміщенні та обладнанні з пилоповітряною сумішшю. При цьому було висунуто гіпотезу, щодо впливу вологості в приміщенні з пилоповітряними сумішами на отримане значення розрахункового надлишкового тиску вибуху. Похибка, з якою буде визначено цю величину, в свою чергу може привести до прийняття хибного рішення щодо визначеної категорії приміщення за вибухопожежонебезпекою. З метою перевірки висунутої гіпотези в дослідженні були проведені розрахунки для двох випадків – без урахування та з урахуванням вологості в повітрі оточуючого середовища. Вхідні значення для розрахунків було обрано згідно до вимог щодо забезпечення параметрів середовища в виробничих приміщеннях з пилоповітряними сумішами. Отримані під час досліджень результати підтвердили висунуту гіпотезу щодо впливу вологості на значення розрахункового надлишкового тиску вибуху. Вплив вологості в навколишньому середовищі на точність отриманого значення розрахункового надлишкового тиску є визнаним фактом та потребує додаткових досліджень. Результати отриманих при дослідженні оцінок підтверджують необхідність урахування впливу вологості середовища в виробничому приміщенні на розрахункове значення надлишкового тиску вибуху. За результатами цих обчислень робиться висновок щодо належності приміщення з пилоповітряною сумішшю до певної категорії за вибухопожежонебезпекою, а також необхідності вжиття запобіжних заходів для зниження пожежовибухонебезпеки середовищ у виробничих приміщеннях.

Ключові слова: вибухопожежонебезека, пилоповітряні суміші, вологість повітря, категорія приміщення за пожежовибухонебезпекою

1. Вступ

Прийнятий в нашій країні стандарт встановлює вимоги відповідно до яких визначається категорія підрозділів виробництв за вибухопожежонебезпекою. Відповідно до визначеної категорії стає необхідним розробити заходи з протипожежної безпеки, які дозволять забезпечити безпечні умови виробництва по відношенню до працівників та умов проведення технологічних процесів [1]. Визначення категорії відносно вибухопожежонебезпеки виробництва дає змогу сформувати протипожежні вимоги щодо попередження виникнення вибухів та пожеж на підприємствах та вжиття заходів як на стадії проектування, так і під час їх експлуатації. Це свідчить про важливість правильного визначення категорії тому, що припущені під час категорування похибки на певний час будуть визначними для вжиття заходів щодо попередження виникнення пожежовибухонебезпечних ситуацій на виробництві. Актуальність проблеми, якій присвячені дослідження, полягає в необхідності урахування чинників, які можуть вплинути на висновок щодо категорії приміщення за пожовибухонебезпекою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Попередження виникнення великих пожеж та вибухів на підприємствах де

© О. М. Роянов, А. М. Катунін, О. В. Кулаков, О. І. Богатов

обертаються, переробляються та зберігаються горючі речовини є вкрай важливим питанням. Питаннями пожежної охорони та захисту займаються відомі світові організації: в Європейському Союзі – Об'єднаний союз пожежного захисту Європи (The Confederation of Fire Protection Associations Europe (CFPA–Europe)) [2], в Сполучених Штатах Америки – Національна протипожежна асоціація (National Fire Protection Association (NFPA) [3], у Великій Британії – Британський інститут стандартів (British Standards Institution (BSI)) [4], NFPA 68. (2002). Guide for Venting of Deflagrations [5], Policy on Fire Protection Rules [6]).

Державна служба України з надзвичайних ситуацій постійно вживає комплекс заходів щодо запобігання виникнення пожеж та вибухів на виробництві. Однією зі складових в цьому процесі є визначення пожежовибухонебезпеки виробництва шляхом присвоєння об'єктам, які оцінюються, певних категорій за пожежовибухонебезпекою.

Основним критерієм під час проведення оцінки є розрахунковий надлишковий тиск вибуху. В проведених дослідженнях наведено та на законодавчій базі закріплені [1–6] детерміновані та затабульовані значення, які дозволяють визначити небезпеку приміщень, але не досить повно враховують максимальну кількість чинників, які впливають на результат обчислень. Таким чином спрощення методики впливає на кінцевий результат обчислень, бо при цьому такий чинник як вологість повітря, що завжди присутній в реальних умовах, не враховується.

Дослідження впливу вологості повітря на середовища з газовими сумішами до спалахування наведені в роботі [7]. За основу визначення такого впливу автори використали оцінку ймовірності виникнення спалаху газоповітряної суміші на основі визначення різниці концентрацій газу за різних значень вологості повітря. В дослідженнях автори навели, що присутня вологість повітря призводить до зменшення густини наявного в приміщенні газу, а збільшення вологості зменшує теплоємність газової суміші.

В роботі [8] досліджено вплив присутньої вологості на потужність вибухів газових сумішей та зміна значень вологості на вірогідність виникнення вибухів. В результаті збільшення вологості призводить до зменшення вірогідності займання.

В роботі [9] авторами було досліджено характер впливу вологого середовища на потужність вибуху з подрібненими частками металу та органічного походження. Під час досліджень вибухонебезпеки розглядались два напрямки: в першому брали в розрахунках до уваги постійну відносну вологість, а у другому її підвищене значення. За результатами досліджень було виявлено вплив вологості повітря на вибухонебезпеку середовищ з пилом та залежність вибухонебезпеки середовища від хімічної складу пилу. Взаємозв'язок хімічної природи часток та відносної вологості повітря полягає у перешкоджанні або сприянні вибухонебезпеки середовищ з пилом.

В роботі [10] розглянуто механізм утворення вибухонебезпечного середовища в робочому просторі із накопиченого вугільного пилу, на основі визначення динамічних деформацій під впливом вибуху в матеріалі, що містить досліджуваний робочий матеріал. При цьому питання впливу вологості повітря на тиск вибуху не розглядались.

В роботі [11] досліджено вплив вологості на розрахунковий тиск вибуху приміщення з легкозаймистою рідиною та розроблено методику, яка дозволила врахувати цей вплив.

В роботі [12] наведено дослідження впливу вологості повітря на вибухопожежонебезпеку середовища з мілкодисперсними частками дерев'яного пилу. За результатами проведених лабораторних досліджень запропоновано використову-

вати вологість повітря як інгібітор, тим самим впливати на вибухопожежонебезпеку підприємства, виробниче середовище якого досліджувалось.

Загальний аналіз робіт [7–12] показав, що вплив вологості на вибухопожежонебезпеку існує, але підхід щодо такої оцінки має ймовірностний характер [7, 8], а у роботах [7–9] стосується тільки певних напрямків досліджень – середовищ з пилом.

Таким чином, проведений аналіз настановних документів [1–6] та публікацій [7–12] показав, що питання врахування вологості повітря в приміщеннях виробництв під час визначення ступеня їх вибухопожежонебезпеки досліджені недостатньо. Питання оцінки впливу вологості повітря на вибухопожежонебезпеку приміщень з пилоповітряними речовинами ще залишаються не повністю розкритими. Під час розрахунку надлишкового тиску вибуху влив вологості повітря на його значення визначений недостатньо для прийняття безумовного рішення про необхідність вжиття запобіжних заходів щодо його попередження.

Проведений аналіз стану питання дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого питанням урахування вологості повітря під час визначення розрахункового надлишкового тиску вибуху, для визначення приналежності приміщення до певної категорії за вибухопожежонебезпекою.

Вивчення стану питання за цим напрямком дає підстави стверджувати, що невирішеною частиною розглянутої проблеми є питання оцінки впливу вологості повітря на вибухопожежонебезпеку приміщень з пилоповітряними сумішами.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є проведення дослідження та розробка методики щодо можливості урахування вологості повітря у виробничих приміщеннях з горючим пилом під час розрахунку значення надлишкового тиску вибуху, який є основним критерієм під час визначення їх категорій за вибухопожежонебезпекою.

Для досягнення поставленої мети потребують розв’язання наступні завдання:

– визначити розрахунковий тиск вибуху пилоповітряної суміші за національним стандартом на конкретному прикладі;

– дослідити вплив вологості повітря в приміщенні на розрахунковий тиск вибуху пилоповітряної суміші та розробити методику її врахування.

4. Матеріали та методи дослідження

В якості об’єкта дослідження було обрано вибухопожежонебезпеку виробничих приміщень, в яких присутній горючий пил на всіх стадіях технологічного процесу. Основна гіпотеза дослідження полягала в тому, що під час прийняття рішення про визначення категорії приміщення за вибухопожежонебезпекою в ході розрахунків надлишкового тиску вибуху враховуються не всі чинники, а саме: вологість присутнього в приміщенні повітря не враховується.

5. Проведення аналізу розрахункового тиску вибуху за національним стандартом

Для проведення аналізу використаємо національну методику [1], з урахуванням пожежонебезпечних властивостей речовин, які обертаються у виробничому приміщенні. В якості дослідної речовини обрано зерновий пил. Дисперсність часток пилу вхідних інгредієнтів має розмір від 340 до 380 мкм, значення відношення маси завислого в повітрі пилу до всієї маси пилу, який може потрапити з апарату до приміщення, приймаємо рівним 0,5 ($К_П = 0,5$), кількість теплоти, яка виділиться при повному згорянні вхідних інгредієнтів, для усіх кормів зернових мають

© О. М. Роянов, А. М. Катунін, О. В. Кулаков, О. І. Богатов

приблизно однакове значення від 18 до 20 МДж/кг ($Q = 18$ МДж / кг). Стосовно характеристик робочого обладнання, то для проведення розрахунків оберемо змішувач (рис. 1) для приготування комбікормової суміші, з продуктивністю $m_б = 1800$ кг, кількість горючого пилу в об'ємі апарату буде дорівнювати $m_а = 250$ кг.

Рис. 1. Змішувач для отримання комбікормової суміші

Відповідно до методики [1] було визначено надлишковий тиск вибуху пилоповітряної суміші в приміщенні приготування комбікормової суміші:

$$\Delta P = \frac{130{,}8 \cdot 16808 \cdot 101 \cdot 0{,}5}{20800 \cdot 1{,}206 \cdot 1{,}01 \cdot (27 + 273)} \cdot \frac{1}{3} = 4{,}989 \text{ кПа}.$$

Оскільки отримане розрахункове значення тиску вибуху приміщення приготування суміші комбікормів не перевищує 5 кПа, то воно не відноситься до вибухопожежонебезпечної категорії «Б». Далі, згідно методики [1], слід проводити розрахунки щодо визначення належності до пожежонебезпечної категорії – «В». Однак зауважимо, що в проведених розрахунках згідно [1] вологість повітря не враховується в жодному з етапів обчислень в ніякому вигляді.

6. Розробка методики урахування впливу вологості на розрахунковий тиск вибуху

Повітря, яке присутнє у виробничих приміщеннях, завжди має характеристику – вологість.

Під час розрахунку надлишкового тиску можливого вибуху в приміщенні згідно методиці [1] вологість повітря не враховується. Слід зазначити, що значення вологості може значно впливати на результат розрахунку з причини особливостей систем вентиляції та аспірації або їх застарілості. Вологість повітря, в свою чергу, залежить від температури в приміщенні або ззовні приміщення. При температурах навколишнього середовища близьких до 0 ˚С вплив носить доволі незначний характер (табл. 1, рис. 2), а при її підвищенні внесок стає вже чутним (рис. 2).

В свою чергу, значення щільності повітря згідно (3) без урахування вологості, яке використовується для розрахунків згідно [1], має незначний характер (рис. 3):

Щільність повітря за різної вологості визначається:

$$\rho = \frac{p_{сух} \cdot M_{сух}}{(R+T)} + \frac{p_{вп} \cdot M_{вп}}{(R+T)}, \quad (1)$$

де $p_{сух}$ та $p_{вп}$ – значення парціального тиску сухого повітря та водяної пари відповідно (тиск вологого повітря буде дорівнювати їх сумі), кПа; $M_{сух}$ та $M_{вп}$ – молярні маси сухого повітря (29,98 г/моль) та водяної пари (18 г/моль); R – газова стала, 8,314 Дж/(моль · К); T – температура повітря в Кельвінах (К).

Табл. 1. Значення щільності повітря (кг/м^3) при зміні вологості від 0 % до 100 % та температури від 0 ˚С до 100 ˚С

Температура, ˚С	Вологість, %					
	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	100 %
0	1,294	1,293	1,293	1,292	1,291	1,291
20	1,206	1,203	1,201	1,199	1,197	1,195
40	1,129	1,122	1,116	1,111	1,104	1,097
60	1,061	1,045	1,029	1,013	0,9975	0,9816
80	1,001	0,9652	0,9297	0,8942	0,8587	0,8232
100	0,9471	0,8753	0,8035	0,7316	0,6598	0,5879

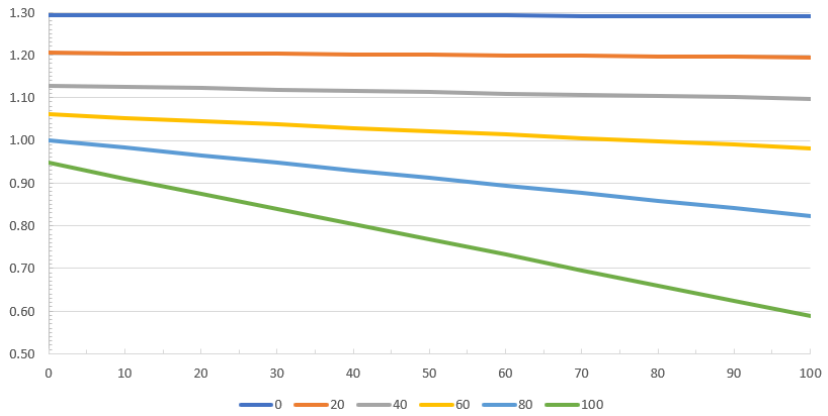


Рис. 2. Щільність повітря (кг/м^3) при зміні вологості від 0 % до 100 % та температури від 0 ˚С до 100 ˚С

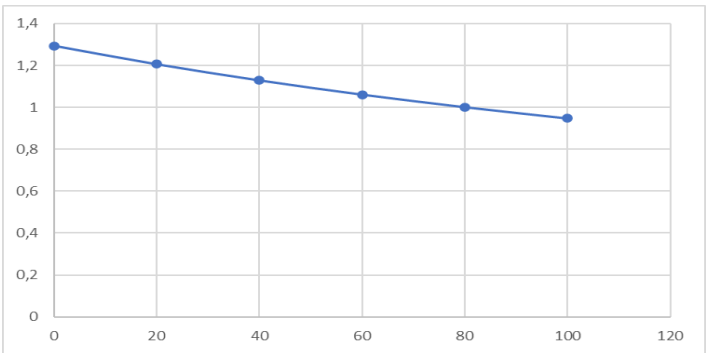


Рис. 3. Щільність повітря (кг/м^3) при без урахування вологості при температурі від 0 ˚С до 100 ˚С

Значення парційного тиску водяної пари описується формулою:

$$p_{вп} = \frac{d \cdot p_0}{(622+d)}, \quad (2)$$

© О. М. Роянов, А. М. Катунін, О. В. Кулаков, О. І. Богатов

де d – вологомісткість вологого повітря, г/кг; p_0 – атмосферний тиск повітря (в ідеальному стані складає 101,325 кПа).

З урахуванням вологості в повітрі атмосферний тиск p_0 описується формулою:

$$p_0 = p_{сух} + p_{вп}. \quad (3)$$

Далі проведемо оцінку впливу вологого повітря в робочому приміщенні, яке приведено для оцінки розрахункового надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші з урахуванням вологості повітря відповідно за методикою [1].

Розраховані значення щільності повітря при температурі 20 °С та при зміні вологості повітря в приміщенні від 0 % до 100 % наведені в табл. 2.

Табл. 2. Значення щільності повітря при температурі 20°С при зміні вологості повітря в приміщенні від 0 % до 100 %

Вологість, %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Щільність повітря, кг/м^3	1,2056	1,2045	1,2035	1,2024	1,2014	1,2003	1,1993	1,1982	1,1971	1,1961	1,195

7. Обговорення результатів дослідження впливу вологості повітря на результати розрахунку тиску вибуху

Мета роботи вирішувалась шляхом визначення категорії приміщення за вибухопожежною небезпекою, яка може виникнути виходячи з фізичного стану пилоповітряної суміші, яка бере участь в технологічному процесі.

Проведені дослідження підтвердили гіпотезу щодо впливу вологості повітря під час розрахунку тиску можливого вибуху пилових сумішей.

Під час розрахунку можливого тиску вибуху згідно державного стандарту [1] встановлено, що ряд вхідних даних подано у фіксованому значенні або довідниковому вигляді для спрощення обчислень. Такий підхід виключає реальні умови у виробничих приміщеннях, що може призвести до отримання хибних результатів значень тиску вибуху.

Під час досліджень було запропоновано розглядати не ідеальну пилоповітряну суміш, яка буде вибухати, а ще враховувати складову – водяна пара, яка завжди присутня в повітрі та характеризується таким параметром як вологість та щільність.

Аналіз проведених розрахунків згідно методики [1] показав, що отримане значення розрахункового надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші буде $\Delta P = 4{,}989$ кПа, а з урахуванням припустимих значень вологості повітря на інтервалі значень від 0 % до 100 % при фіксованому значенні температурі 20 °С від $\Delta P_0 = 4{,}9869881$ кПа до $\Delta P_{100} = 5{,}0312241$ кПа. Запропонована методика розглядалась на прикладі пилоповітряної суміші, яка виділяється під час виготовлення комбікормів.

Проведена оцінка показала, що зміна значень вологості повітря впливає на значення розрахункового надлишкового тиску вибуху пилоповітряної суміші. Проте слід зазначити, що запропоновану методику врахування вологості повітря при визначенні розрахункового тиску вибуху можливо застосовувати з огляду взаємодії пилоповітряних сумішей з водою.

8. Висновки

1. Відповідно до національного стандарту з урахуванням особливостей технологічного процесу на прикладі визначено тиск вибуху у виробничому примі-

щенні пилоповітряної суміші. Розрахунковий надлишковий тиск вибуху сягнув 4,989 кПа. Для розрахунків були використані всі рекомендації щодо фіксованості або визначених заздалегідь деяких параметрів, які необхідні для цих розрахунків. Наприклад, стосовно параметрів навколишнього середовища – враховані тільки його температура, атмосферний тиск та теплоємність.

2. Визначено факт залежності тиску вибуху пилоповітряної суміші від вологості повітряного середовища та розроблено методику, яка дозволить це врахувати. З цією метою було проведено аналіз впливу відносної вологості на щільність повітря в приміщенні при реальній робочій температурі повітря в приміщенні. В роботі показано, що зміна вологості повітря на інтервалі від 0 % до 100 % за температури в приміщенні 20 °С призводить до коливання значення щільності повітря від 1,2056 кг/м^3 до 1,195 кг/м^3.

Тому з огляду на можливість виникнення вибуху було розглянуто пилоповітряну суміш та повітря з урахуванням його відносної вологості. Використавши запропоновану методику урахування вологості було проведено оцінку розрахункового тиску вибуху, яка показала зміну його значення від 4,9869881 кПа до 5,0312241 кПа при зміні вологості повітря від 0 % до 100 %. Відхилення отриманих значень від значення розрахункового надлишкового тиску кПа згідно національного стандарту підтверджують наявність впливу вологості в робочих приміщеннях на значення розрахункового тиску вибуху. Таким чином, базуючись на висунутій гіпотезі щодо впливу вологості повітря у виробничих приміщеннях на розрахунковий надлишковий тиск вибуху, де присутні пилоповітряні суміші, отримано значення, які характеризують ступень зазначеного впливу. Проте запропонована методика може бути використана з певними обмеженнями. Ці обмеження стосуються властивостей речовин щодо їх взаємодії з водою, яка може бути присутня та характеризуватися вологістю повітря та потребують подальших досліджень. Отримані результати досліджень відповідно запропонованої методики свідчать про наявність впливу вологості повітря в робочому приміщенні на значення розрахункового надлишкового тиску вибуху та необхідність врахування зазначеного впливу.

Література

1. ДСТУ Б В.1.1–36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [Чинний від 2017–01–01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 31 с. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0158858–16#Text

2. The Confederation of Fire Protection Associations Europe (CFPA–Europe). (2022). Retrieve from URL: https://cfpa–e.eu/

3. National Fire Protection Association (NFPA). (2022). URL: https://www.nfpa.org

4. British Standards Institution (BSI). (2022). URL: https://www.bsigroup.com/

5. NFPA 68. (2002). Guide for Venting of Deflagrations. URL: https://www.nfpa.org/codes–and–standards/all–codes–and–standards/list–of–codes–and–standards/detail?code=68

6. Policy on Fire Protection Rules URL: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/policy_on_fire_protection_rules.pdf

7. Darie M., Burian S., Ionescu J., Csaszar T., Moldovan L., Colda C., Andriş A. Air humidity – a significant factor on ignition sensitivity of gaseous explosive atmospheres. Proc. The Xth Environmental legislation, safety engineering and disaster management, Cluj–Napoca, Romania, 2014. 47 c. URL: https://www.researchgate.net/publication/272158810_AIR_HUMIDITY_–_A_SIGNIFICANT_FACTOR_ON_IGNITION_SENSITIVITY_OF_GASEOUS_EXPLOSIVE_ATMOSPHERES

© О. М. Роянов, А. М. Катунін, О. В. Кулаков, О. І. Богатов

8. Darie M., Burian S., Csaszar T., Moldovan L., Moldovan C. (2017) New aspects regarding ignition sensitivity of air–methane mixtures Environmental Engineering and Management Journal, Romania. June 2017. Vol. 16. № 6. P. 1263–1267. URL: https://www.researchgate.net/profile/Doru–Cioclea/publication/319523058_Method_for_improving_the_management_of_mine_ventilation_networks_after_an_explosion/links/5b17c994aca272021ce9153b/Method–for–improving–the–management–of–mine–ventilation–networks–after–an–explosion.pdf#page=25

9. Khudhur D. A., Ali M. W., Abdullah T. A. T. Mechanisms, Severity and Ignitability Factors, Explosibility Testing Method, Explosion Severity Characteristics, and Damage Control for Dust Explosion: A Concise Review. Journal of Physics: Conference Series. «International laser technology and optics symposium in conjunction with photonics meeting 2020» (ILATOSPM-2020), 22–23 October 2020, Malaysia, Johor. doi: 10.1088/1742–6596/1892/1/012023

10. Kostenko V., Liashok Y., Zavialova O., Pozdieiev S., Kostenko T. The deformation dynamics of the experimental adit's material during a coal dust explosion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. Vol. 4. № 7–106. P. 54–62. doi: 10.15587/1729-4061.2020.209409

11. Роянов О. М., Катунін А. М., Мележик Р. С., Богатов О. І. Оцінка впливу вологості повітря на розрахунковий надлишковий тиск вибуху. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2(36). С. 312–324. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17442

12. Shun-Chieh Chang, Yu-Chi Cheng, Xin-Hai Zhang, Chi-Min Shu. Efects of moisture content on explosion characteristics of incense dust in incense factory. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2021. URL: https://d-nb.info/123260920X/34

O. Roianov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
A. Katunin*[1]*, *PhD, Senior Research Scientist, Associate Professor of the Department*
O. Kulakov*[1]*, *PhD, Associate Professor, Senior Researcher Scientist of Research center*
O. Bogatov*[2]*, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
[1]National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
[2]Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF AIR HUMIDITY ON THE EXPLOSION AND FIRE HAZARD OF PREMISES WITH COMBUSTIBLE DUST

Estimated explosion pressure of the dust-air mixture in the industrial premises was evaluated taking into account air humidity to determine the category of the premises according to explosion and fire hazard. The study presents data that demonstrate the presence of water vapor in the air and reflect its sensitivity to ambient temperature. During the research, the calculation of the overpressure of the explosion in the working room and equipment with a dust-air mixture was carried out. At the same time, a hypothesis was put forward regarding the influence of humidity in the room with dust-air mixtures on the obtained value of the calculated overpressure of the explosion. The error with which this value will be determined, in turn, can lead to the adoption of a wrong decision regarding the specified category of the premises in terms of explosion and fire hazard. In order to test the proposed hypothesis, calculations were carried out for two cases – without taking into account and taking into account the humidity in the air of the surrounding environment. The input values for the calculations were chosen in accordance with the requirements for ensuring environmental parameters in industrial premises with dust-air mixtures. The results obtained during the research confirmed the proposed hypothesis regarding the influence of humidity on the value of the calculated overpressure of the explosion. The influence of humidity in the environment on the accuracy of the obtained value of the calculated excess pressure is a recognized fact and requires additional research. The results of the estimates obtained during the study confirm the need to take into account the influence of the humidity of the environment in the production room on the calculated value of the excess pressure of the explosion. Based on the results of these calculations, a conclusion is made regarding the belonging of a room with a dust-air mixture to a certain category in terms of explosion-fire hazard, as well as the need to take precautionary measures to reduce the fire-explosion hazard of environments in industrial premises.

Keywords: explosion and fire hazard, overpressure of explosion, flammable dust, explosion dust, category of premises according to fire and explosion hazard

References

1. DSTU B V.1.1–36:2016. Vyznachennia katehorii prymishchen, budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybukhopozhezhnoiu ta pozhezhnoiu nebezpekoiu, 31. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0158858–16#Text

2. The Confederation of Fire Protection Associations Europe (CFPA–Europe). (2022). Available at: https://cfpa–e.eu/

3. National Fire Protection Association (NFPA). (2022). Available at: https://www.nfpa.org

4. British Standards Institution (BSI). (2022). Available at: https://www.bsigroup.com/

5. NFPA 68. (2002). Guide for Venting of Deflagrations. Available at: https://www.nfpa.org/codes–and–standards/all–codes–and–standards/list–of–codes–and–standards/detail?code=68

6. Policy on Fire Protection Rules Available at: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/policy_on_fire_protection_rules.pdf

7. Darie, M., Burian, S., Ionescu, J., Csaszar, T., Moldovan, L., Colda, C., Andriş, A. (2014). Air humidity – a significant factor on ignition sensitivity of gaseous explosive atmospheres. Proc. The Xth Environmental legislation, safety engineering and disaster management, Cluj–Napoca, Romania. 47. Available at: https://www.researchgate.net/publication/272158810_AIR_HUMIDITY_–_A_SIGNIFICANT_FACTOR_ON_IGNITION_SENSITIVITY_OF_GASEOUS_EXPLOSIVE_ATMOSPHERES

8. Darie, M., Burian, S., Csaszar, T., Moldovan, L., Moldovan, C. (2017). New aspects regarding ignition sensitivity of air–methane mixtures Environmental Engineering and Management Journal, Romania. June 2017, 16, 6, 1263–1267. Available at: https://www.researchgate.net/profile/Doru–Cioclea/publication/319523058_Method_for_improving_the_management_of_mine_ventilation_networks_after_an_explosion/links/5b17c994aca272021ce9153b/Method–for–improving–the–management–of–mine–ventilation–networks–after–an–explosion.pdf#page=25

9. Khudhur, D. A., Ali, M. W., Abdullah, T. A. (2020). T. Mechanisms, Severity and Ignitability Factors, Explosibility Testing Method, Explosion Severity Characteristics, and Damage Control for Dust Explosion: A Concise Review. Journal of Physics: Conference Series. «International laser technology and optics symposium in conjunction with photonics meeting 2020» (ILATOSPM-2020), 22–23 October 2020, Malaysia, Johor. doi:10.1088/1742–6596/1892/1/012023.

10. Kostenko, V., Liashok, Y., Zavialova, O., Pozdieiev, S., Kostenko, T. (2020). The deformation dynamics of the experimental adit's material during a coal dust explosion. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4, 7–106, 54–62. doi: 10.15587/1729-4061.2020.209409

11. Roianov, O., Katunin, A., Melezhyk, R., Bogatov, O. (2022). Evaluation of the influence of air humidity on the calculated explosion overpressure. Problems of Emergency Situations, 2(36), 312–324. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/17442

12. Shun-Chieh, Chang, Yu-Chi, Cheng, Xin-Hai, Zhang, Chi-Min, Shu. (2021). Efects of moisture content on explosion characteristics of incense dust in incense factory. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. Available at: https://d-nb.info/123260920X/34

Надійшла до редколегії: 02.03.2024
Прийнята до друку: 16.04.2024

© О. М. Роянов, А. М. Катунін, О. В. Кулаков, О. І. Богатов

UDC 614.8

N. Lysak, *Graduate Student (ORCID 0000-0001-5338-4704)*
O. Skorodumova, *DSc, Professor, Professor of the Department (ORCID 0000-0002-8962-0155)*
A. Chernukha, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department (ORCID 0000-0002-0365-3205)*
Y. Goncharenko, *PhD, Senior Lecturer of the Department (ORCID 0000-0002-1766-3244)*
R. Melezhyk, *Researcher of the Department (ORCID 0000-0001-6425-4147)*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

SILICOPHOSPHATE FIREPROOF COATINGS FOR BUILDING MATERIALS

The composition of silicophosphate fire-resistant coatings for wooden building structures was developed and their properties were investigated. Fireproof compositions were obtained by mixing aqueous solutions of liquid glass and acetic acid. As a phosphate-containing additive, phosphate buffer solutions were used, which were added to the silicic acid sol in different amounts and with different ratios of the components of the buffer pair. Adjusting the ratio of the components of the buffer solution led to a change in the pH of the buffer solutions, but adding them to the sol did not change its acidity, which was in the pH range of 5, 5–6. The effect of the content and ratio of the components of the buffer pair on the change in the optical density of the obtained sols over time was studied. The highest durability of the flame retardant composition was recorded when using a buffer solution with a pH of 7 at a content of 20 %. The embedding of phosphate ions into the siloxane framework of experimental gels has been chemically proven, which increases their fire resistance. It is shown that the amount of free phosphate anion in the intermicellar liquid of the experimental gels is less than 5 %. The mechanism of the strengthening effect of the acetate buffer solution, which is formed during the mixing of the liquid glass solution with acetic acid, on the phosphate buffer solution is proposed. Fire-retardant compositions were applied to wood samples by the bath method and dried at temperatures of 80–100 ℃ in a drying cabinet. The fire protection effect of coatings was determined during fire tests in a ceramic pipe. The effect of the content of phosphate buffer solution on the fire-retardant properties of experimental coatings was studied. It is shown that increasing the content of the phosphate buffer solution reduces mass loss during fire tests, allows to increase the fire resistance of wood and transfer it to the group of «highly flammable».

Keywords: fire-resistant coatings, building materials, liquid glass, SiO_2 sol, phosphate buffer solution, fire resistance

1. Introduction

According to the new DBN B.1.2-7:2021, the problem of «fire safety engineering», which consists in the design and development of systems and measures aimed at preventing and limiting the spread of fires in buildings, becomes of key importance. Such a complex of actions necessarily includes the selection of fire-resistant building materials and their processing with special compositions for the purpose of forming fire-resistant coatings.

Almost any type of construction involves the use of wooden building structures. The wide use of wood is explained by its environmental friendliness, strength, ease of processing and good thermal insulation properties. However, according to flammability indicators, this material belongs to group 4, that is, under the action of an open fire, it ignites, supports combustion and burns almost completely, which can lead to the loss of material values and the death of people.

To reduce the flammability class, compositions based on flame retardants are used to impregnate and treat wood. Intumescent type fireproof coatings are quite promising today. As a rule, these are multi-component systems, the composition of which must necessarily include porophores – substances capable of decomposing when heated and

burning with the release of gaseous products that provide swelling (swelling). The main problem in the application of such coatings is ensuring the durability and preservation of the integrity of the intumescent layer on the surface of the protected substrate. After all, flame retardant components can be washed out of environmentally safe water-based coatings over time under the influence of adverse climatic factors. Increasing the adhesive strength and uniform distribution of the composition on the surface is usually achieved by introducing modifying additives, which often have quite high prices.

In view of the above, the search and development of relatively cheap and environmentally friendly fire retardant materials for wood are urgent.

2. Analysis of literary data and formulation of the problem

For effective fire protection of wood, as a rule, silicate and sol-gel coating methods are used. The silicate method consists in impregnating samples directly with a solution of a silicon-containing compound, most often liquid glass. In particular, in works [1–3], it was established that the treatment of wooden samples with a solution of sodium silicate contributes to an increase in fire resistance, a reduction in the time of burning and ignition was recorded, and an improvement in the mechanical and thermal insulation properties of wood was also observed. Just as the formation of a coating exclusively on a pure inorganic silicate base is often accompanied by uneven distribution on the surface of the sample, unsatisfactory adhesion characteristics, lack of resistance to climatic conditions, and as a result – cracking and delamination, in works [4, 5] organic modifying additives were used: isocyanates [1, 2] and acrylates [3–5]. It was experimentally established that the addition of these substances to the compositions makes it possible to provide more effective fire resistance indicators and improve the surface interaction between the coating and the base. The above-mentioned works are of great practical and theoretical importance, but one should take into account the fact that the proposed organic modifying additives can pose a threat to human life and the environment.

Today, the sol-gel method is a promising method for obtaining silicate coatings, as it allows for improved resistance to atmospheric influences, adhesion, and increased strength compared to silicate coatings [6, 7]. In most of the works devoted to fire-resistant coatings of wood, silica sols are obtained on the basis of organosilanes with simultaneous modification with inorganic components. For example, in work [8] solutions of tetraethoxysilane and hydrochloric acid were used as precursors, and the synergistic effect of potassium carbonate was also investigated. K_2CO_3 contributed to the ignition of the wood sample at lower temperatures, and the sol formed a compact and molten barrier on the surface, which prevented the transfer of heat and combustible gases in the condensed phase. The authors of the paper [9] conducted a study of fire-retardant properties and kinetics of thermal decomposition of wood treated with silicic acid sol modified with boric acid. The sol was also obtained on the basis of tetraethoxysilane. It was found that the addition of H_3BO_3 contributed to a significant improvement in fire resistance compared to wood treated with unmodified sol. Undoubtedly, the results of works [8, 9] deserve attention, but it should be taken into account that organosilanes are expensive and often less environmentally safe than inorganic analogues.

Silicic acid sols are usually stable in strongly acidic and strongly alkaline environments, but the treatment of samples with such compositions can cause a weakening of the physical and mechanical properties of wood [10]. It was established that in order to obtain sols with high fluidity in an environment close to neutral, it is advisable to use

 © N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, Y. Goncharenko, R. Melezhyk

buffer systems. In particular, it was previously investigated [11] that acetic acid, which is added to the liquid glass solution for the formation of silica sol, contributes to the formation of the buffer pair CH_3COOH / CH_3COO^-, ensures the maintenance of pH in the range of 5–6. This value of the hydrogen index is satisfactory for obtaining more durable SiO_2 sols of low concentration.

It is known that phosphorus- and nitrogen-containing compounds demonstrate good flame retardant properties. The mutual positive influence of nano-SiO_2 airgel and ammonium phosphate on the fire resistance of wood was evaluated by the authors of the paper [12], and the ability of phosphorous flame retardant to be embedded in the structure of the siloxane frame, which prevented excessive leaching, was noted.

Taking into account the rationality of using buffer solutions in the studied systems and improving the fire resistance of coatings in the presence of Phosphorus, it would be expedient to consider the effect of phosphate buffer systems on the properties of silica sols and analyze the problem of developing the composition of a flame retardant composition based on them.

3. The purpose and tasks of the research

The purpose of the work is to determine and justify the optimal composition of silicophosphate composition as a basis for fire-resistant coating of wooden building structures.

To achieve the goal, it was necessary to complete the following tasks:

– to investigate the effect of the content and composition of the phosphate buffer solution on the physical and chemical properties of silicic acid sols;

– to determine the influence of silicon phosphate coating on the fire resistance of wood samples.

4. Research materials and methods

The object of research is fire protection of wooden building structures.

The subject of research are the processes of transformation of fire-resistant coatings during the action of fire.

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

Silicic acid sol was obtained using solutions of liquid glass and acetic acid. Phosphate buffer solutions with pH 6, 7 and 8 prepared by mixing NaH_2PO_4 and Na_2HPO_4 solutions were used as modifying additives, while the volume fraction of the buffer solution was varied.

To determine the content of phosphates embedded in the gel structure, a photometric method was used using a molybdenum mixture (solutions of ammonium molybdate, stibium (III) chloride, sulfanilic and tartaric acids) in the presence of ascorbic acid. Changes in the optical density of sols over time were determined using a KFC-2 photocolorimeter. A solution of molybdenum mixture and ascorbic acid was used as a comparison solution.

Scots pine wood samples with dimensions of 9x6x3 cm were pre-dried in a drying cabinet at 100 °C to a constant mass. Silica sol, modified with phosphate buffer solutions, was applied to the wood surface using a bath method and dried in an oven at 80 °C. The coated samples were additionally treated with a solution of ammonium hydrogen phosphate by spraying and dried again.

5. Study of the influence of the content of phosphate buffer solution on the properties of experimental sols

The dependence of the change in the optical density of the experimental silicic acid sols (obtained with the help of acetic acid) over time on pH was studied for compositions with a phosphate buffer solution content of 15, 20 and 25 % by volume. All three dependencies had an identical character, and the curves practically overlapped each other. Fig. 1 shows changes in the optical density of sols over time depending on the pH of the buffer solution with a volume fraction of 20 %.

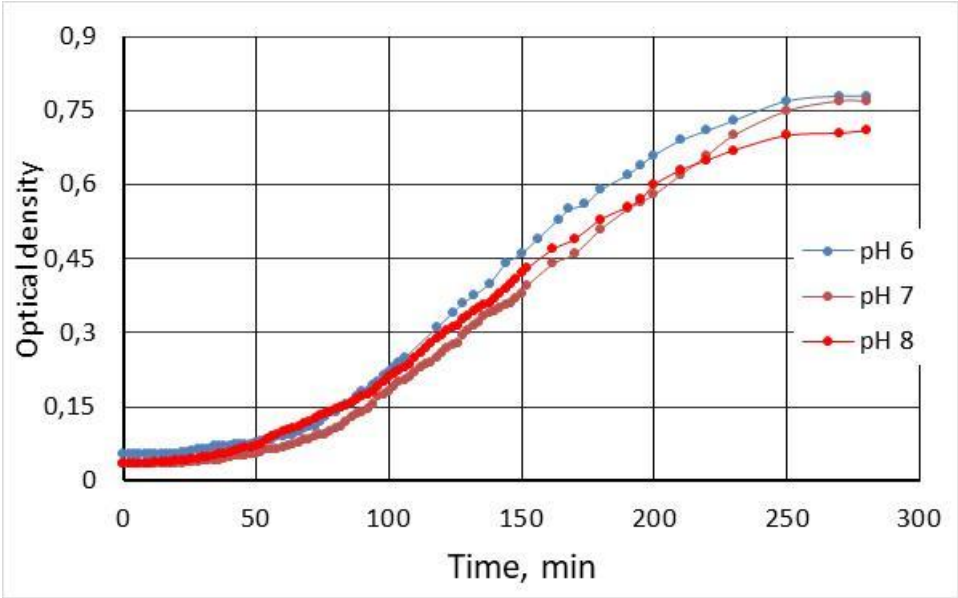


Fig. 1. The dependence of the change in the optical density of the experimental silicic acid sols over time on the pH of the phosphate buffer solution

Analysis of the obtained dependencies indicates an increase in the survival time of sols compared to systems with orthophosphate acid additives, which were studied earlier [13]. The value of the optical density at which the sols lost their fluidity remained practically unchanged regardless of the pH and the content of the buffer solution.

Fig. 2 presents the dependences of latent coagulation time and sol viability on the buffer solution content.

Fig. 2 shows that the latent coagulation time was the lowest for sols with buffer solution additives with a pH of 6, while it is possible to note the growth of the parameter with an increase in the buffer solution content. For compositions with pH 7 and 8, this characteristic was practically the same.

In order to establish how completely phosphate ions are incorporated into the siloxane framework, the difference between the content of phosphate added with the buffer solution and the mass fraction of PO_4^{3-} ions in the intermicellar liquid, which is released during the aging of the sol and transition to a gel, was determined (Tabl. 1).

Tabl. 1. Results of determining the mass fraction of phosphate ions that were incorporated into the siloxane framework of gels

№	pH of the buffer solution added to the composition	pH of the intermicellar fluid	w(PO_4^{3-}), which is embedded in the siloxane framework, %
1	6	5	97, 3
2	7	5	96, 6
3	8	5	98

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, Y. Goncharenko, R. Melezhyk

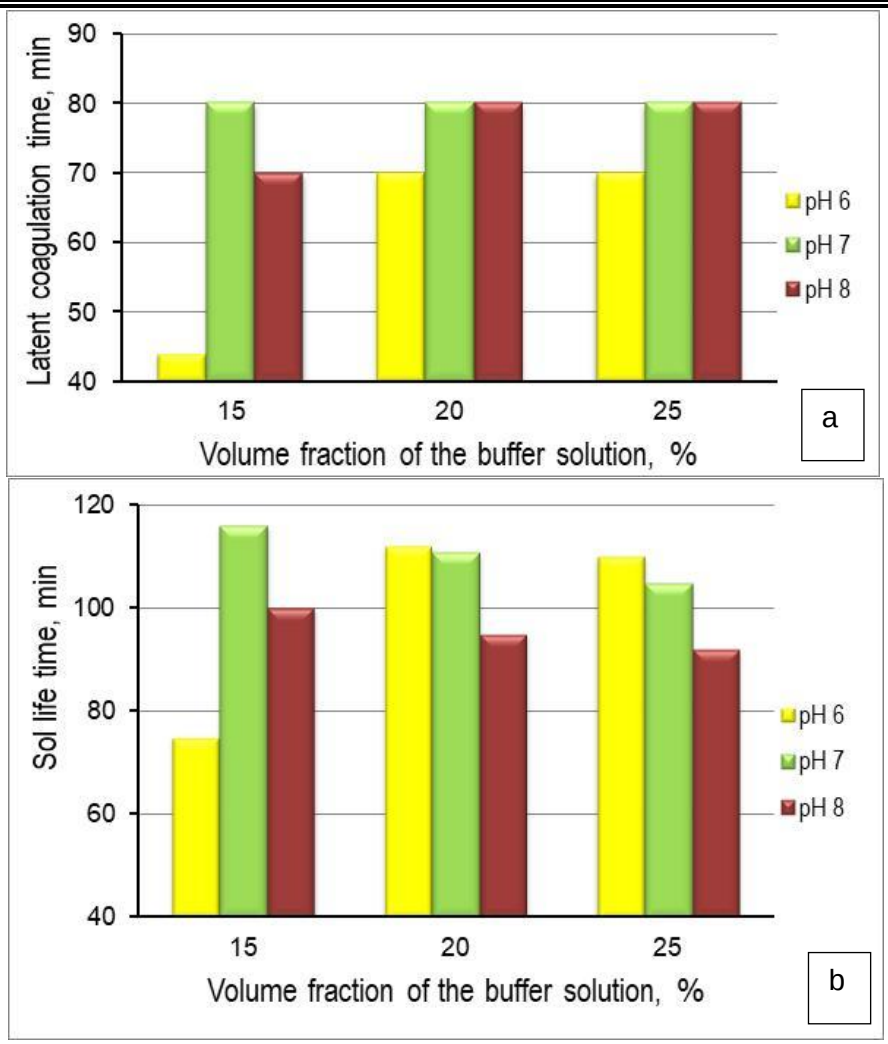


Fig. 2. Dependence of latent coagulation time (a) and sol viability (b) on the volume fraction of the buffer solution

The results of the experiment indicate that phosphate ions are almost completely embedded in the siloxane framework. On the other hand, clathrates are formed in the structure of the gel coating, where both water molecules and phosphate ions can be retained. The pH of the intermicellar fluid remained constant regardless of the pH value of the added buffer solution. This can be explained by the higher buffer capacity of the acetate buffer solution (pH 5 is in the interval of its buffering effect), which is formed when adding acetic acid to the composition, compared to phosphate.

It is known that orthophosphate acid can also be used to obtain SiO_2 sol. At the same time, processes with the formation of a phosphate buffer solution can occur in the «liquid glass – H_3PO_4» system, which confirms the following reactions:

$$Na_2SiO_3+H_2O=NaHSiO_3+NaOH$$
$$NaHSiO_3+H_3PO_4=NaH_2PO_4+H_2SiO_3\downarrow$$
$$NaH_2PO_4+NaOH=Na_2HPO_4+H_2O$$

In addition, it can be assumed that the orthophosphate ion undergoes hydrolysis, also forming a buffer pair of hydrogen phosphate-dihydrophosphate:

$$PO_4^{3-}+H_2O\rightleftarrows HPO_4^{2-}+OH^-$$
$$HPO_4^{2-}+H_2O\rightleftarrows H_2PO_4^-+OH^-$$

On the other hand, if orthophosphate acid is added to the acetate buffer solution as a modifying additive, the formation of two buffer solutions can be considered, the joint action of which is shown in Fig. 3.

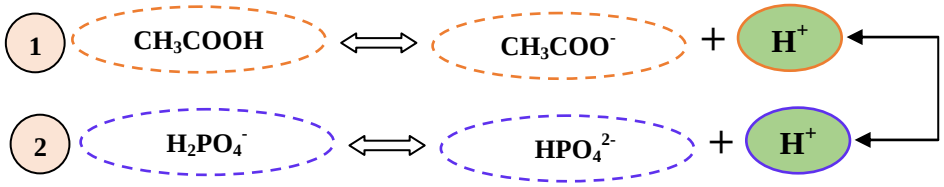


Fig. 3. Scheme of joint action of acetate and phosphate buffer systems

Equilibrium processes 1 and 2 are closely related: when the concentration of acetic acid increases, the equilibrium shifts in process (1) to the right, and in reaction (2) to the left. That is, it can be stated that when the concentration of CH_3COO^- ions increases, the concentration of HPO_4^{2-} decreases. But the dissociation constants of these processes should also be taken into account:

$$K_a(1)=1{,}8 \cdot 10^{-5} > K_a(2)=6{,}2 \cdot 10^{-8}$$

The dissociation constant of acetic acid is almost 300 times higher compared to the dissociation constant of the dihydrophosphate ion, so the CH_3COO^-/CH_3COOH system exerts a greater buffering effect and at the same time strengthens the effect of the phosphate buffer solution.

6. Study of the effect of silicon phosphate coating on the fire resistance of wood samples

The results of fire tests of wood samples with a coating applied in three layers are presented in Fig. 4.

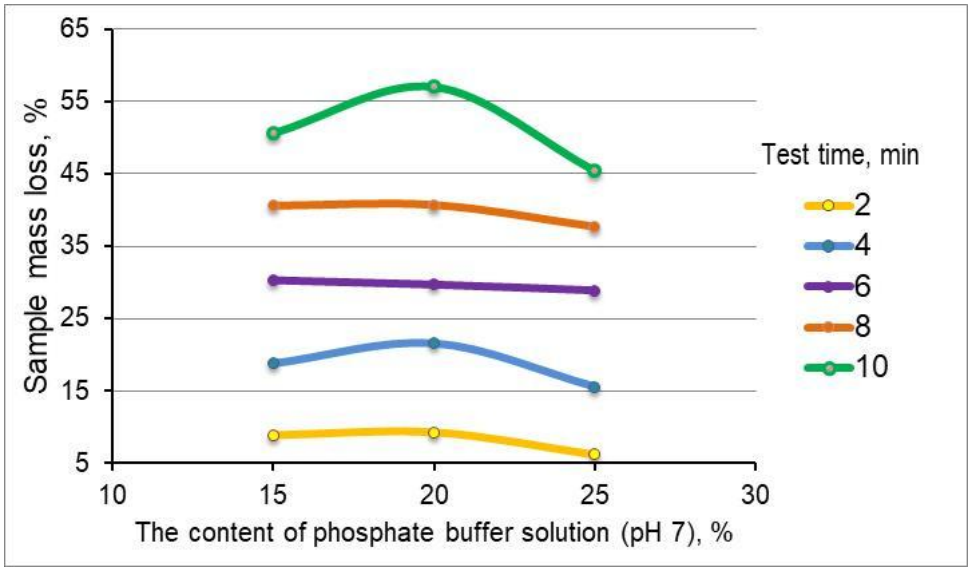


Fig. 4. Influence of the content of the phosphate buffer solution with pH 7 and the duration of the fire test on the weight loss of samples with a three-layer coating

Fig. 4 shows a decrease in the weight loss of the samples with an increase in the phosphate buffer solution additive content. Regardless of the duration of the fire test, there is a slight decrease in the mass loss of the samples in the case of adding 25 % of

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, Y. Goncharenko, R. Melezhyk

the buffer solution.

Fig. 5 shows the change in mass and temperature of a sample with a three-layer coating based on a composition with a 25 % phosphate buffer solution with a pH of 7. The graph clearly shows a periodic decrease in temperature, which corresponds to the gradual decomposition of the gel coating under the action of fire.

Tabl. 2 shows the results of studies on the determination of the group of fire-resistant effectiveness of the coating.

The results of studies on the determination of the flammability group of wood samples with a fire-resistant coating with the addition of 25 % phosphate buffer solution are shown in the Tabl. 3.

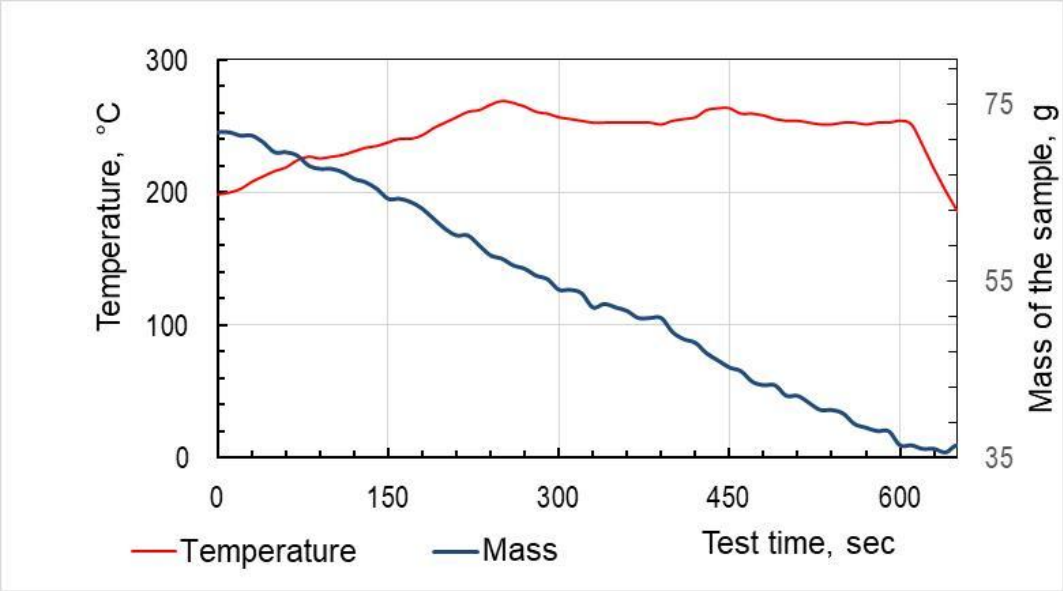


Fig. 5. The nature of the change in mass and temperature of the sample with a coating based on a composition with a 25 % phosphate buffer solution with a pH of 7

Tabl. 2. Results of determination of the group of fire-resistant efficiency of experimental coatings on wood

Number of coating layers	Mass of the sample		Sample mass loss, %	Group of fire protection efficiency of the coating
	to the tests,	after 2 min of testing, g		
1	71,83	66,17	7,9	I
3	72,58	68,06	6,2	I

The mass loss values of samples with one- and three-layer coating do not exceed 9 %, i.e., the first group of fire-resistant coating efficiency is established according to [15].

According to [16], wood covered with one layer of flame retardant composition belongs to non-flammable materials, since the maximum increase in the temperature of gaseous combustion products is <60 °C and the loss of sample weight is less than 60 %. The sample covered with three layers of sol is combustible because Δt_{max}>60 °C and belongs to nonflammable materials because the time to reach Δt_{max}>240 s. Therefore, based on the calculations, better fire resistance is provided by a single-layer coating.

7. Discussion of the results of the study of the influence of phosphate buffer systems on the properties of sols

The addition of orthophosphate acid, even in small quantities and at any degree of dilution, leads to instant coagulation in the silicic acid sol. But in the case of adding

H_3PO_4 to a mixture of liquid glass and acetic acid, coagulation does not occur for the reasons given in the hydrolysis reactions of the orthophosphate ion. The same reactions accompany the processes of silicophosphate coating formation in the case of adding a phosphate buffer solution. Despite the fact that the pH of the buffer solutions was changed from 6 to 8 by changing the ratio of the components of these solutions, after their addition to the mixture of liquid glass and acetic acid, the pH of the composition was 5. A weakly acidic environment significantly reduces the viability of sols, but due to the fact that phosphate buffer solutions are diluted, when their content is increased, some dilution of the composition also occurs, which increases its survivability, which is illustrated in Fig. 1 and Fig. 2. Analysis of the curves in Fig. 1 allowed us to establish that the highest fluidity and the longest latent coagulation time were characteristic of the sol with the additive buffer solution with pH 7.

Tabl. 3. Results of studies on the determination of the flammability group of wood samples with a fire-resistant coating

Number of coating layers	Temperature of gaseous combustion products, °C		Δt_{max}, °C	The time interval until the maximum temperature is reached	Mass of the sample		Sample mass loss, %	Flammability
	primary	maximum			to the tests, g	after testing, g		
1	200	255	55	300	71,83	54,00	24,8	heavy-flammable
3	196	269	73	300	72,58	57,88	20,3	flammable, highly flammable

In this case, it is possible to consider the joint action of the acetate and phosphate buffer systems in the system (Fig. 3). At the same time, the acetate buffer solution will enhance the effect of phosphate.

The controlled content of H+ ions by the action of a complex acetate-phosphate buffer solution leads to the initiation of net polycondensation in the silicic acid sol and, as a result, to the formation of clathrates in the structure of the gel coating. Such a coating is able to decompose in a wide temperature range. It should also be taken into account that the water content in the compositions increases, which, evaporating, also provides local cooling of the surface of the gel coating. Thus, the greater the content of the phosphate buffer solution, the smaller will be the mass loss of samples during fire tests (Fig. 4). If several layers of coating are applied to the surface of wood samples, under the action of fire, graded thermal destruction of each layer of coating will occur, which is illustrated in Fig. 5: the temperature of the sample periodically decreased during the fire tests. The gradual removal of water vapor from the surface of the coating at temperatures of 200–300 °C leads to an increase in the porosity of the coating, which additionally thermally insulates the surface of the wood. The assumptions made are confirmed by the results presented in Tabl. 2 and Tabl. 3. The presence of clathrates in the structure of the gel coating, formed due to the presence of a phosphate buffer solution, increases the fire resistance of wood samples with an experimental coating and brings it to the 1st group of fire-retardant efficiency. Depending on the degree of homogeneity of the gel coating and the number of applied layers, the samples can be either heavy-flammable or highly flammable.

Further research involves studying the structure of a sol-based coating with a defined composition on the surface of building materials, in particular wood and extruded polystyrene.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, Y. Goncharenko, R. Melezhyk

8. Conclusions

1. The effect of the content and composition of phosphate buffer solutions on the physical and chemical properties of silicic acid sols was studied. The highest durability of the flame retardant composition was recorded when using a buffer solution with a pH of 7 at a content of 20 %. Using a chemical method, it was established that phosphate ions are almost completely incorporated into the siloxane framework under the conditions of adding a phosphate buffer pair. In the case of adding orthophosphoric acid as a phosphate-containing additive, a phosphate buffer solution is also formed, the effect of which is enhanced by the presence of an acetic buffer solution, which is formed during the production of SiO_2 sol from liquid glass. The mechanism of enhancing effect of acetate buffer solution on phosphate buffer pair is proposed.

2. Theoretically justified and experimentally proven fire protection effect of the developed coatings on wood. It is shown that the complex action of two buffer solutions – acetate and phosphate – manifests itself in the initiation of net polycondensation in silicic acid sol and, as a result, in the formation of clathrates in the structure of the gel coating, which gradually decompose under the influence of fire with an endothermic effect. Coating with compositions based on silicic acid sol, modified with a phosphate buffer solution allows you to transfer the wood to the "high-burning" group. The set composition of the composition provides the I group of fire-resistant coating efficiency.

References

1. Zhang, T., Xi, J., Qiu, S., Zhang, B., Luo, Z., Xing, W., Song, L., Hu, Y. (2021). Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety. Journal of Colloid and Interface Science, 604, 378–389. doi: 10.1016/j.jcis.2021.06.135

2. Cheng, J., Zhou, F. (2016). Flame-retardant properties of sodium silicate/polyisocyanate organic–inorganic hybrid material. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 125(2), 913–918. doi: 10.1007/s10973-016-5454-2

3. Zhang, Y., Guan, P., Ma, X., Li, P., Sun, Z., Li, X., Zuo, Y. (2023). Study on the Effect of acrylic acid emulsion on the properties of poplar wood modified by sodium silicate impregnation. Forests, 14(6), 1221. https://doi.org/10.3390/f14061221

4. Mohebby, B., Hajialian, M. (2022). Stabilization of Sodium Silicate with Polyacrylate in Wood Concerning Fire Resistance. Research Square, 1–21. doi: 10.21203/rs.3.rs-2147290/v1

5. Yona, A. M. C., Žigon, J., Dahle, S., Petrič, M. (2021). Study of the adhesion of Silicate-Based coating formulations on a wood substrate. Coatings, 11(1), 61. doi: 10.3390/coatings11010061

6. Loganina, V. I., Kislitsyna, S. N., Mazhitov, Y. B. (2018). Development of sol-silicate composition for decoration of building walls. Case Studies in Construction Materials, 9, 1–7. doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00173

7. Loganina, V. I., Mazhitov, Y. B., Skachkov, Y. P. (2019). Durability of coatings based on Sol silicate paint. Defect and Diffusion Forum, 394, 1–4. doi: 10.4028/www.scientific.net/ddf.394.1

8. He, S., Wu, W., Zhang, M., Qu, H., Xu, J. (2016). Synergistic effect of silica sol and K_2CO_3 on flame-retardant and thermal properties of wood. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 128(2), 825–832. doi: 10.1007/s10973-016-5947-z

9. Liu, Q., Chai, Y., Lin, N., Lyu, W. (2020). Flame Retardant Properties and Thermal Decomposition Kinetics of Wood Treated with Boric Acid Modified Silica Sol. Materials, 13(20), 4478. doi: 10.3390/ma13204478

10. Skorodumova, O., Chebotareva, O., Sharshanov, A., Chernukha, A. (2023).

Selection of precursors of safe silica-based fireproof coatings for textile materials. Problems of Emergency Situations, 1(37), 192–202. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-14

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. Zhu, X., Wu, Y., Tian, C., Qing, Y., Yao, C. (2014). Synergistic Effect of Nanosilica Aerogel with Phosphorus Flame Retardants on Improving Flame Retardancy and Leaching Resistance of Wood. Journal of Nanomaterials, 2014. 1–8. doi: 10.1155/2014/867106

13. HOST 16363-98. Zasoby vohnezakhysni dlia derevyny. Metody vyznachennia vohnezakhysnykh vlastyvostei. Chynnyi z 01.09.2000. Mizhderzhavna Rada zi standartyzatsii, metrolohii i sertyfikatsii, 1998, 7.

14. 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.

15. 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

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

СИЛІКОФОСФАТНІ ВОГНЕЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено склад силікофосфатних вогнезахисних покриттів для дерев'яних будівельних конструкцій та досліджено їх властивості. Вогнезахисні композиції отримували змішуванням водних розчинів рідкого скла та оцтової кислоти. Як фосфатовмісну добавку використовували фосфатні буферні розчини, які додавали до золю кремнієвої кислоти в різній кількості та з різним співвідношенням компонентів буферної пари. Коригування співвідношення компонентів буферного розчину призводило до зміни pH буферних розчинів, але додавання їх до золю не змінювало його кислотність що знаходилася в інтервалі pH 5,5–6. Досліджували вплив кількості та співвідношення компонентів буферної пари на зміну оптичної густини отриманих золів в часі. Найбільша живучість вогнезахисної композиції зафіксована при використанні буферного розчину з pH 7 при вмісті 20 %. Хімічним шляхом доведено вбудовування фосфат-іонів в силоксановий каркас експериментальних гелів, що забезпечує підвищення їх вогнестійкості. Показано, що в інтерміцелярній рідині експериментальних гелів заходиться вільний фосфат-аніон у кількості менше 5 %. Запропоновано механізм підсилювальної дії ацетатного буферного розчину, який утворюється під час змішування розчину рідкого скла з оцтовою кислотою, на фосфатний буферний розчин. Вогнезахисні композиції наносили на зразки деревини ванним методом та сушили за температур 80–100 °С в сушильній шафі. Вогнезахисну дію покриттів визначали під час проведення вогневих досліджень в керамічній трубі. Досліджено вплив вмісту фосфатного буферного розчину на вогнезахисні властивості експериментальних покриттів. Показано, що збільшення вмісту фосфатного буферного розчину знижує втрати маси під час вогневих досліджень, дозволяє підвищити вогнестійкість деревини та перевести її до групи «важкогорючі».

Ключові слова: вогнезахисні покриття, будівельні матеріали, рідке скло, золь SiO_2, фосфатний буферний розчин, вогнестійкість

Література

1. Zhang T., Xi J., Qiu S., Zhang B., Luo Z., Xing W., Song L., Hu Y. Facilely produced highly adhered, low thermal conductivity and non-combustible coatings for fire safety. Journal of Colloid and Interface Science. 2021. Vol. 604. P. 378–389. doi:

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha, Y. Goncharenko, R. Melezhyk

10.1016/j.jcis.2021.06.135

2. Cheng J., Zhou F. Flame-retardant properties of sodium silicate/polyisocyanate organic–inorganic hybrid material. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. Vol. 125. № 2. P. 913–918. doi: 10.1007/s10973-016-5454-2

3. Zhang Y., Guan P., Ma X., Li P., Sun Z., Li X., Zuo Y. Study on the Effect of acrylic acid emulsion on the properties of poplar wood modified by sodium silicate impregnation. Forests. 2023. Vol. 14. № 6. P. 1221. doi: 10.3390/f14061221

4. Mohebby B., Hajialian M. Stabilization of Sodium Silicate with Polyacrylate in Wood Concerning Fire Resistance. Research Square. 2022. P. 1–21. doi: 10.21203/rs.3.rs-2147290/v1

5. Yona A. M. C., Žigon J., Dahle S., Petrič M. Study of the adhesion of Silicate-Based coating formulations on a wood substrate. Coatings. 2021. Vol. 11. № 1. P. 61. doi: 10.3390/coatings11010061

6. Loganina V. I., Kislitsyna S. N., Mazhitov Y. B. Development of sol-silicate composition for decoration of building walls. Case Studies in Construction Materials. 2018. Vol. 9. P. 1–7. doi: 10.1016/j.cscm.2018.e00173

7. Loganina V. I., Mazhitov Y. B., Skachkov Y. P. Durability of coatings based on Sol silicate paint. Defect and Diffusion Forum. 2019. Vol. 394. P. 1–4. doi: 10.4028/www.scientific.net/ddf.394.1

8. He S., Wu W., Zhang M., Qu H., Xu J. Synergistic effect of silica sol and K_2CO_3 on flame-retardant and thermal properties of wood. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. Vol. 128. № 2. P. 825–832. doi: 10.1007/s10973-016-5947-z

9. Liu Q., Chai Y., Lin N., Lyu W. Flame Retardant Properties and Thermal Decomposition Kinetics of Wood Treated with Boric Acid Modified Silica Sol. Materials. 2020. Vol. 13. № 20. P. 4478. doi: 10.3390/ma13204478

10. Skorodumova O., Chebotareva O., Sharshanov A., Chernukha A. Selection of precursors of safe silica-based fireproof coatings for textile materials. Problems of Emergency Situations. 2023. Vol. 1. № 37. P. 192–202. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-14

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. Zhu X., Wu Y., Tian C., Qing Y., Yao C. Synergistic Effect of Nanosilica Aerogel with Phosphorus Flame Retardants on Improving Flame Retardancy and Leaching Resistance of Wood. Journal of Nanomaterials. 2014. P. 1–8. doi: 10.1155/2014/867106

13. ГОСТ 16363-98. Засоби вогнезахисні для деревини. Методи визначення вогнезахисних властивостей. Чинний з 01.09.2000. Міждержавна Рада зі стандартизації, метрології і сертифікації, 1998. 7 с.

14. 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.

15. 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

Надійшла до редколегії: 04.03.2024
Прийнята до друку: 11.04.2024

УДК 699.842+691.175

***А. В. Скрипинець*[1]**, *к.т.н. ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-3845-8303)*
***Н. В. Саєнко*[2]**, *к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0003-4873-5316)*
***О. М. Григоренко*[2]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4629-1010)*
***К. А. Афанасенко*[2]**, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0003-1877-1551)*
***О. В. Макаренко*[1]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4125-2365)*
[1]*Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків, Україна*
[2]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

ВАЖКОГОРЮЧА ВІБРОЗАХИСНА МАСТИКА ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Розроблено важкогорючу епоксиуретанову мастику з підвищеними вібродемпфуючими властивостями та необхідними фізико-механічними властивостями для облицювання внутрішніх металевих поверхонь рухомого складу залізничного транспорту. В якості полімерної матриці використовували епоксиуретанові сітчасті полімери. Для зниження горючості використовували вогнезахисну добавку поліфосфат амонію, для надання тиксотропних властивостей – наповнювач із гідрофобізованою поверхнею Аеросил. Як метод дослідження в'язкопружних властивостей застосовували динамічну механічну спектроскопію, за допомогою динамічного релаксометра. Вивчення в'язкопружних властивостей проводили в області ультра низьких частот 0,7–1,0 Гц, що мінімізує дію зовнішніх механічних впливів на зміну структури полімерної матриці в температурному інтервалі від –100 °С до +100 °С. Визначено, що склади на основі олігоефірциклокарбонату, модифікованого епоксидіановим олігомером характеризуються кращими показниками демпфуючої здатності (tgδ=0,97). Встановлено, що розроблена мастична композиція із вмістом антипірену та тиксотропної добавки має найбільші значення демпфуючої здатності (tgδ=0,45–0,47) у високоеластичній області, даний склад може бути використаний як вібропоглинаючий матеріал, працездатний при температурі від –60 °С до +60 °С. В результаті комплексної оцінки пожежної небезпеки було встановлено, що розроблена мастика відноситься до групи вогнехахисних матеріалів з повільним поширенням полум'я, володіє помірною димоутворювальною здатністю і відноситься до категорії помірнонебезпечних матеріалів з точки зору токсичності. Досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої вібропоглинаючої мастики вказує на перспективу подальшого використання її для облицювання внутрішньої металевої поверхні кузова залізничного рухомого складу з метою забезпечення пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Ключові слова: епоксиуретанова мастика, в'язкопружні дослідження, демпфування, пожежна безпека, токсичність, залізничний рухомий склад

1. Вступ

З кожним роком вимогам пожежної безпеки на транспорті, що забезпечує пасажирські перевезення, приділяється все більше уваги. Залізничний транспорт на сьогоднішній день є одним з найпопулярніших видів транспорту. Сьогодні технічний стан пасажирських вагонів українського залізничного транспорту характеризується значним зношуванням, що призводить до аварійних ситуацій (близько 85 %) [1–3].

Модернізація внутрішньої частини кузова на ремонтних підприємствах за допомогою інноваційних рішень дозволить відновити цілісність елементів конструкції з продовженням терміну її служби. Використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є традиційним рішенням для покращення стану і створення комфорту при перевезенні пасажирів на залізницях [4–6].

Використання таких ПКМ для рухомого складу залізничного транспорту забезпечить його довговічність, зменшення ваги і знижує експлуатаційні витрати. Однак використання ПКМ у пасажирському рухому складу може збільшити ризик пожежі або загибелі пасажирів [7, 8].

 © А. В. Скрипинець, Н. В. Саєнко, О. М. Григоренко, К. А. Афанасенко та ін.

Відомо, що вагон пасажирського поїзда може вигоріти за кілька хвилин (час безпечної евакуації людей з вагона становить 5–6 хвилин з моменту загоряння). Матеріали, з яких виготовлені панелі і перегородки під час пожежі сприяють інтенсивному горінню, температура горіння стелі може досягати 1100 °С.

Ще однією проблемою, пов'язаною з «зношеними» пасажирськими транспортними засобами є підвищення рівня вібрації і шуму, викликаних рухом вагонів, що знижує комфорт пасажирів під час перевезення [9]. Згідно з ДСТУ UIC 513:2004 «Вагони магістральні пасажирські. Настанова з оцінювання комфорту пасажирів залежно від вібрації» вібрації, що впливають на організм пасажира, можуть викликати дратівливість, головні болі, порушення уваги, підвищену ймовірність неврозів тощо.

Вимоги щодо пожежної безпеки матеріалів та внутрішнього обладнання пасажирських вагонів (систем опалення, вентиляції, електрообладнання) наведені у ДСТУ 4049 та ДСТУ 4493.

Згідно до ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Вимоги безпеки. Зі зміною № 1» матеріали, що використовуються у конструкції пасажирського вагона та для внутрішнього немеханічного обладнання, повинні відповідати наступним вимогам щодо пожежної безпеки: група горючості – негорючі або важкогорючі, коефіцієнт димоутворювальної здатності – не більшим 500 $м^2$/кг; за показником токсичності відповідати класу малонебезпечних або помірнонебезпечних; текстильні матеріали повинні бути важкозаймистими згідно з ДСТУ 4155.

Отже, актуальність даної теми обумовлена потребою впровадження заходів щодо зниження пожежної небезпеки залізничного транспорту та вібраційного впливу, що виникає внаслідок руху вагона. Ці заходи спрямовані на збільшення безпеки пасажирських перевезень та зниження ризику пожеж та інших аварійних ситуацій на залізничному транспорті.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Згідно до ДСТУ 7773 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загальні технічні вимоги» і ДСТУ 7774 «Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Загально технічні норми для розрахування та проектування механічної частини вагонів» та ДСТУ 7776 «Вагони-самоскиди (думпкари). Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих думпкарів залізниць колії 1520 мм» застосовують лакофарбові покриття на основі фенолоформальдегідних, поліуретанових, епоксидних олігомерів, що забезпечує конструкції пасажирського вагона довговічність, антикорозійні та водостійкі властивості. Однак призначення цих лакофарбових тонкошарових покриттів – забезпечити надійність вже наявних покриттів. У зв'язку з цим актуальним є забезпечення комплексної пожежної безпеки та віброзахисних властивостей пасажирських вагонів за допомогою полімерних композиційних мастик, товщиною від 2 до 4 мм.

В роботах [10, 11] наведено такі традиційні полімерні мастики на основі невисихаючих герметиків, як хлорбутилкаучук, поліетилен, поліізобутилен. Недоліком використання таких складів у залізничному рухомому складу є те що вони відносяться до горючих речовин. Інша група полімерних мастик на основі водної полівінілацетатної дисперсії, що використовуються для внутрішньокорпусних покриттів залізничних вагонів, характеризується зниженою горючістю та стабільністю технологічних властивостей. Однак недоліком таких відомих матеріалів є

низькі віброакустичні показники (коефіцієнт механічних втрат 0,2 при температурі 20 °С) [12].

В роботі авторів [13] було показано, що з точки зору технології одержання та застосування вібропоглинаючих покриттів найбільш доцільно використання отверджуючих систем на основі сумішей олігоефірциклокарбонатних та епоксидіанових олігомерів. Для поверхонь деталей машин, механізмів, захисних кожухів, транспортних засобів з метою зниження рівня вібрації та шумів також застосовуються важкогорючі мастики [13] на основі епоксидного олігомеру з цільовими добавками. Основним недоліком є те, що вони характеризуються недостатнім рівнем демпфуючої здатності (коефіцієнт механічної сили 0,25 при температурі 20 °С). При переведенні таких олігомерів в твердий стан за допомогою амінів – отримуємо зшиті епоксигідроксиуретанові полімерні композиції, що поєднують у собі високі значення адгезійно-механічної міцності [14, 15] та тангенсу кута механічних втрат, але мають не визначенні показники щодо їх пожежної безпеки.

У зв'язку з цим, невирішеною частиною проблеми є відсутність комплексного підходу до розробки та впровадження важкогорючих і віброзахисних полімерних мастик для залізничного рухомого складу. У той же час як і раніше існує необхідність в розробці матеріалів, що одночасно забезпечують пожежну безпеку, мають високі віброакустичні характеристиками і відповідають всім стандартам безпеки та якості.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка та оцінка можливості використання важкогорючої епоксиуретанової мастики з підвищеними вібропоглинаючими характеристиками і необхідними фізико-механічними властивостями для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів рухомого залізничного складу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Дослідити вплив реакційно здатних олігомерів і вогнезахисної добавки на в'язкопружні властивості полімерної матриці та розробити склади наповнених епоксиуретанових мастик з підвищеними вібродемпфуючими властивостями та необхідними фізико-механічними властивостями.

2. Провести комплексну оцінку пожежної безпеки розробленої епоксиуретанової мастики за наступними показниками: група горючості, коефіцієнт димоутворення, показник токсичності горіння продукту та індекс поширення полум'я.

4. Матеріали та методи дослідження

Предметом дослідження є епоксиуретанові (ЕУ) сітчасті полімери, отримання яких засноване на взаємодії суміші циклокарбонатвмісних та епоксидних олігомерів з амінами.

Об'єктом дослідження є процеси підвищення вібродемпфуючих властивостей та пожежної безпеки епоксиуретанових мастик для застосування у внутрішньому облицюванні кузовів рухомого залізничного складу.

Беручи до уваги вищевикладене, сформульовано наукову гіпотезу: підвищити вібродемпфуючі та вогнестійкі властивості епоксиуретанової мастики можна шляхом підбору співвідношення олігомерів та введення наповнювачів (вогнезахисної та тиксотропної добавки). Вважається, що взаємна модифікація епоксидних і уретанових олігомерів поєднує одночасно міцності і релаксаційні властивості, що дозволить отримати композиції з високими демпфуючими характеристи-

 © А. В. Скрипинець, Н. В. Саєнко, О. М. Григоренко, К. А. Афанасенко та ін.

ками. В якості вогнезахисної добавки запропоновано використання поліфосфат амонію для збільшення виходу нелеткого коксового залишку та зменшення горючих продуктів піролізу з утворенням поверхневого склоподібного розплавленого шару поліметафосфорної кислоти. Для отримання мастики передумовою є введення поверхнево-модифікованого аеросилу до полімерної матриці, що надасть змогу при незначному підвищення ефективної в'язкості збільшити їх ступінь структурованості.

Тож, для отримання епоксиуретанових композицій використовували олігоефірциклокарбонат марки Лапролат (ОЦК) і епоксидно-діановий олігомер марки ЕД-20 (ЕД). Для отвердження олігомерів використовували діетилентріамін (ДЕТА) – отверджувач амінного типу.

Для зниження горючості ПКМ використовували вогнезахисну добавку – поліфосфат амонію (ПФА) у кількості 25 мас.ч. Основною перевагою ПФА є вміст азоту в межах 14–15 % та фосфору не менше 70 %. Для надання мастиці тиксотропних властивостей використовували наповнювач із гідрофобізованою поверхнею Аеросил марки АМ-1-300 у кількості 1,5 мас.ч.

Двокомпонентну мастику наносили на металеву поверхню методом напилення або спеціальним шпателем завтовшки 2–3 мм.

В якості основного методу вивчення в'язкопружних характеристик було обрано метод динамічної механічної спектроскопії, який реалізовується на крутильному маятнико-динамічному релаксометрі. Такий метод дозволяє дослідити властивості полімерних матеріалів в області ультра низьких часто. Вивчення в'язкопружних властивостей ПКМ, проводили в області ультра низьких частот 0,7–1,0 Гц, що мінімізує дію зовнішніх механічних впливів на зміну структури ПКМ [16] в температурному інтервалі від –100°С до +100°С. З отриманих експериментальних даних розраховувалися динамічний модуль пружності (G', E'), тангенс кута механічних втрат tgδ і модуль втрат G". Ці показники пов'язані між собою tgδ=G"/G'.

Для вивчення комплексної оцінки пожежної безпеки розроблених мастик проводили дослідження згідно ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські локомотивної тяги. Вимоги безпеки». Для порівняльної оцінки пожежної безпеки розроблених епоксиуретанових мастик використовували аналог на основі епоксидної смоли: група горючості (ДСТУ 8829:2019), нижня теплота згоряння, ΔНс, кДж/кг (ДСТУ ISO 1928:2006), коефіцієнт димоутворення, Dm, $м^2$/кг, (ДСТУ 8829:2019).

Для обробки експериментальних даних та розрахунку динаміко-механічних характеристик, комплексної оцінки пожежної безпеки використовувалися спеціалізовані програмні засоби: LabVIEW та Mathcad.

5. Дослідження епоксиуретанових олігомерів і вогнезахисної добавки на в'язкопружні властивості полімерної матриці

Результати досліджень динамічних механічних властивостей сітчастих епоксиуретанових композицій (ЕУ) залежно від співвідношення епоксидного олігомеру та олігоефірциклокарбонату (ЕД:ОЦК) наведені на рис. 1 (температурні залежності динамічного модуля зсуву G') та рис. 2 (тангенс механічних втрат tgδ).

Як видно з рис. 1 та рис. 2, зі збільшенням вмісту епоксидного олігомеру ЕД у суміші з олігоефірциклокарбонатним олігомером від 10:90 до 30:70 мас.ч., температура склування (пік tgδ) епоксиуретанових композицій спочатку знижується на 5°С, досягаючи мінімуму при вмісті 20 мас.ч. ЕД. Після цього температура склування підвищується на 11 °С, що супроводжується розширенням піку tgδ та

зменшенням максимальних значень tgδ.

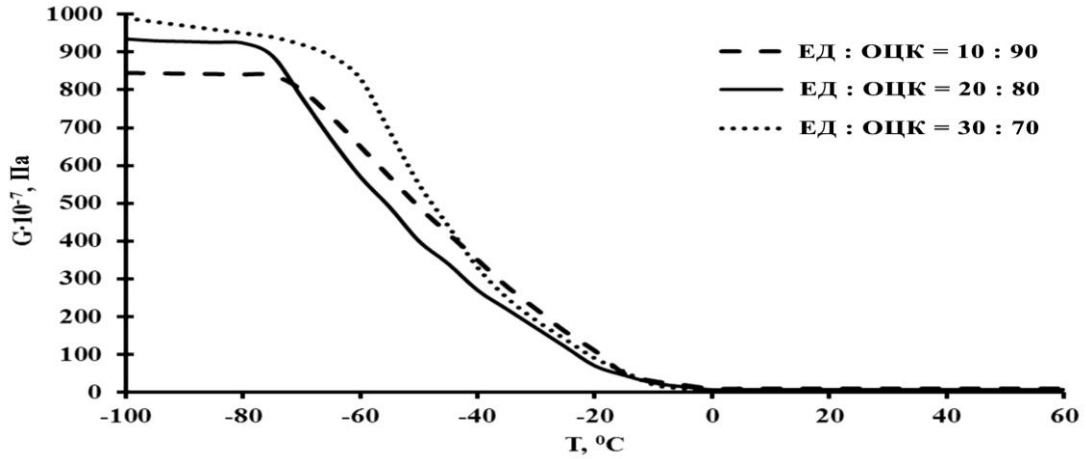


Рис. 1. Температурні залежності динамічного модуля зсуву G' ЕУ композицій від співвідношення олігомерів ЕД:ОЦК=10:90, 20:80, 30:70 мас.ч.

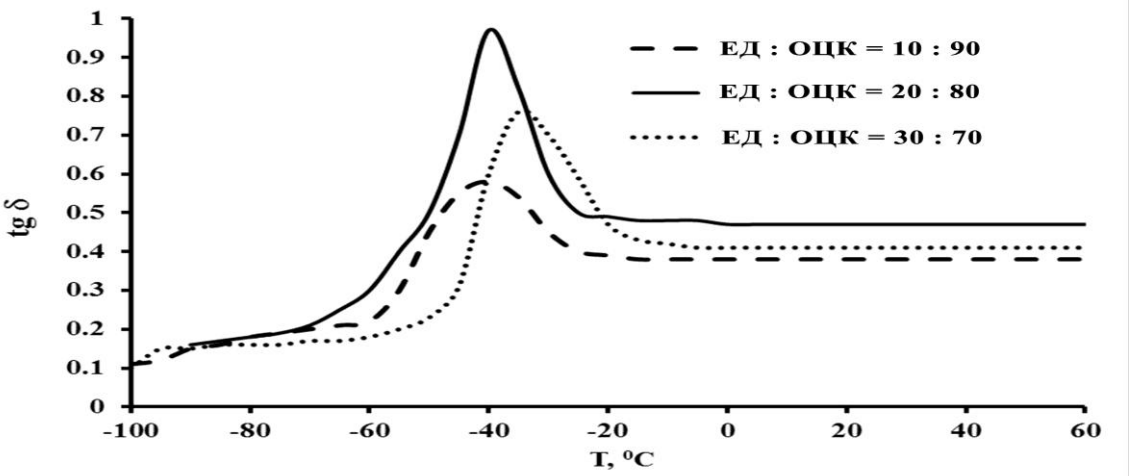


Рис. 2. Температурні залежності тангенсу механічних втрат tgδ ЕУ композицій від співвідношення олігомерів ЕД:ОЦК=10:90, 20:80, 30:70 мас.ч.

Поряд з цим для складу ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч. відзначається звуження піку механічних втрат і підвищення максимального значення tgδ до 0,97. Така зміна в характеристиках піку механічних втрат вказує на підвищення кооперативності процесу розморожування молекулярної рухливості основних сегментів полімерної сітки, що властиво для полімерів з більш однорідною структурою. Крім того, при цьому співвідношенні у високоеластичному стані найбільший рівень tgδ характерний для складу ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч. і становить приблизно 0,48–0,50.

Результати досліджень динамічних механічних властивостей сітчастих епоксиуретанових композицій наведені на рис. 3 і рис. 4. На цих рисунках показані температурні залежності тангенса кута механічних втрат (tgδ) і динамічного модуля зсуву (G') для різних епоксидних олігомерів (рис. 3) і композицій, наповнених поліфосфатом амонію та аеросилом (рис. 4). З графіків видно, що форма кривих динамічного модуля і тангенса кута механічних втрат при зміні температури схожа з кривими для ненаповнених композицій.

Аналіз кривих зміни динамічного модуля зсуву показав, що введення до складу ПФА та Аеросилу приводить до збільшення модуля на 20 %. При цьому відбувається більш повільна зміна динамічного модуля в міру підвищення темпе-

 © А. В. Скрипинець, Н. В. Саєнко, О. М. Григоренко, К. А. Афанасенко та ін.

ратури до температур початку процесу «розсклування», а сама область «розсклування» зміщується різною мірою у бік вищих температур, а температурний інтервал α-переходу не зазнає помітних змін, на відміну від ненаповнених ЕД:ОЦК композицій.

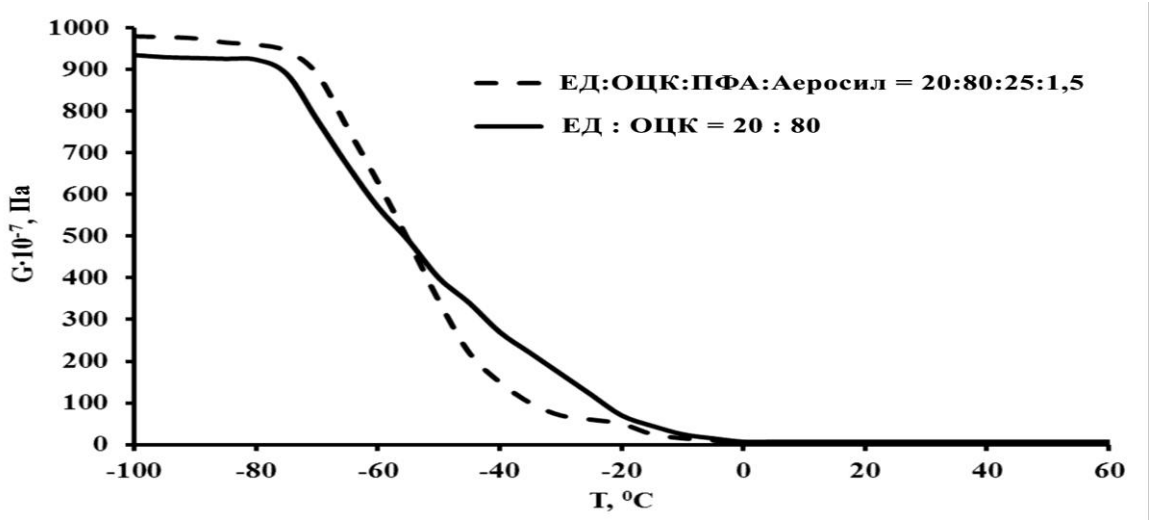


Рис. 3. Температурні залежності динамічного модуля зсуву G' ненаповненої ЕУ композиції (ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч.) та наповненою композиції ПФА та Аеросилом

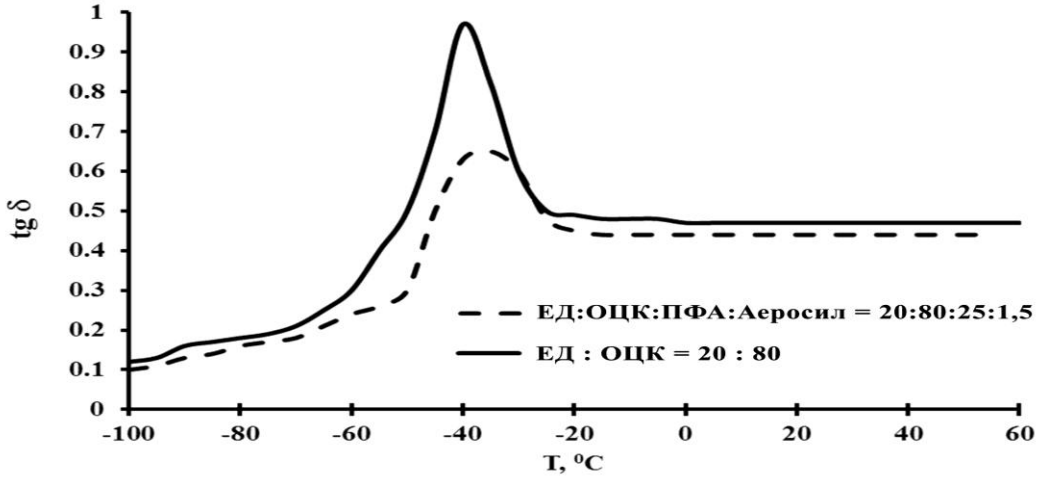


Рис. 4. Температурні залежності тангенса механічних втрат tgδ ненаповненої ЕУ композиції (ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч.) та наповненою ПФА та Аеросилом

Деяких змін зазнає і температурна залежність tgδ наповнених ЕУ композицій. Показано, що введення ПФА та Аеросилу призводить до незначного підвищення температури склування (близько 3 °С), але сприяє зниженню механічних втрат на 33 % (від 0,97 до 0,65) порівняно з ненаповненою композицією.

6. Дослідження пожежної безпеки розробленої епоксиуретанової мастики

Для комплексної оцінки пожежної безпеки розроблених мастик проводили дослідження згідно ДСТУ 4049 «Вагони пасажирські локомотивної тяги. Вимоги безпеки». Для порівняльної оцінки пожежної безпеки розроблених епоксиуретанових мастик використовували аналог на основі епоксидної смоли (табл. 1).

В табл. 2 наведені результати токсикологічних досліджень аналогу на основі епоксидної смоли та розробленої епоксиуретанової віброзахистної мастики.

Табл. 1. Вимоги пожежної безпеки згідно ДСТУ 4049

Показники	Аналог на основі епоксидної смоли	Розроблена епоксиуретанова композиція
Група горючості (ДСТУ 8829:2019)	горючий, середньої займистості	важкогорючий, важкої займистості
Нижня теплота згоряння, ΔHc, кДж/кг (ДСТУ ISO 1928:2006)	32060	19780
Коефіцієнт димоутворення, Dm, $м^2/кг$, (ДСТУ 8829:2019) – при тлінні – полум'яне горіння	 1307,5 552,6	 986 485
Індекс поширення полум'я (ДСТУ 8829:2019)	22,8 швидко поширюють полум'я по поверхні (група І3)	8 повільно поширюють полум'я по поверхні (група І2)

Табл. 2. Токсикологічні дослідження аналогу на основі епоксидної смоли та розробленої епоксиуретанової віброзахистної мастики

Показник токсичності продуктів горіння за різних температур		Композиції	
		Аналог на основі епоксидної смоли	Розроблена епоксиуретанова композиція
H_{CL50}, $г/м^3$	450 °С	65,5±6,3	55,6±7,6
HbCO, %		58,4±2,6	59,2±2,9
H_{CL50}, $г/м^3$	750 °С	86,1±9,9	88,5±10,3
HbCO, %		61,6±3,1	62,8±3,1

Матеріали випробувалися в двох режимах: в термоокислювальному розкладанні (450 °С) та в полум'яному горінні (750 °С). Крім того, дуже важливим є показник HbCO, що показує вміст карбоксигемоглобіну в крові загиблих піддослідних тварин відразу після експозиції в камері згоряння. За цим показником визначають переважні біохімічні механізми токсичної дії продуктів горіння. Вважається, що токсичний ефект продуктів горіння обумовлюється переважно дією монооксиду вуглецю, коли у крові тварин значення HbCO становлять 50 % і більше. Однак, автори робот [17–20] вважають, що тільки при концентраціях HbCO менше 60 % токсичний ефект, несумісний з життям, обумовлений присутністю в газовій суміші як провідних (монооксид вуглецю та діоксиду вуглецю), так і мінорних компонентів (зокрема для пінополіуретанів присутністю в суміші ціаністого водню), а також їх комбінованим впливом.

7. Обговорення результатів можливості використання розробленої епоксиуретанової мастики

Запропонований підхід отримання ефективного вібропоглинаючого матеріалу на основі полімерної композиції полягає на створені таких композиції, які б володіли у необхідному діапазоні температур і частот максимальними значеннями тангенса механічних втрат (tgδ) або модуля механічних втрат G", які відповідно є мірою розсіяної енергії [21, 22]. При цьому максимальні значення tgδ повинні знаходитися в області переходу від склоподібного до в'язкопружного стану.

Проведений аналіз показав, що зміна динамічних властивостей із збільшенням вмісту ЕД на перший погляд неоднозначна (рис. 1, 2). При вмісті 20 % мас.ч. ЕД в суміші олігоефірциклокарбонатному олігомеру спостерігається збільшення піку максимального значення tgδ та його звуження, що свідчить про впорядкуван-

ня сегментарної здатності та підвищення структурної однорідності. Однак зсув піку tgδ, температури склування на 3–5 °С до нижчих температур, подовження інтервалу склування, більш різке зниження модуля зсуву в склоподібному стані та поява додаткових піків tgδ низької інтенсивності в області (–80) °С – (–70) °С свідчать про деяке розпушення структури.

При подальшому збільшенні концентрації ЕД до 30 мас.ч. разом зі збільшенням абсолютних значень модуля пружності в склоподібному стані (при – 100 °С) спостерігається ще більш різке зниження з підвищенням температури, що свідчить про подальше розпушення структури відповідних полімерів у склоподібному стані. Це пов'язано з тим, що зі збільшенням вмісту ЕД збільшується щільність просторової сітки та кількість об'ємних ароматичних структур, які знижують ефективність міжмолекулярної взаємодії в склоподібному стані, внаслідок чого локальна молекулярна рухливість за рахунок руху фрагментів гідроксиуретанових ланцюгів буде «розморожуватися» при більш низьких температурах.

Як видно з рис. 2, найбільші значення tgδ=0,48–0,50 у високоеластичному стані спостерігаються для ЕУ матеріалів при співвідношенні суміші ЕД:ОЦК=20:80 мас.ч., тому дану композицію можна використовувати як основу для створення вібропоглинаючих мастик.

У попередніх дослідженнях авторами було встановлено [9, 23], що для ефективного зниження горючості сітчастих композицій можна використовувати вогнезахисну добавку поліфосфат амонію (ПФА) у кількості 25 мас.ч. У результаті динамічно-механічних та в'язкопружних досліджень встановлено, що мастика ЕД:ОЦК, яка наповнена ПФА та Аеросилом, має високі демпфуючі властивості (tgδ=0,45–0,47) у високоеластичній області, тому з практичної точки зору даний матеріал може працювати як при низьких (від –60 °С), так і при помірних температурах (+60 °С).

Комплексна оцінка пожежної безпеки розробленої епоксиуретанової мастики показала, що розроблена епоксиуретанова мастика відноситься до групи важкогорючих матеріалів, при введенні антипірену знижується коефіцієнт димоутворення при горінні (Dm=485 $м^2$/кг), що дозволяє віднести розроблений матеріал до групи з помірною димоутворювальною здатністю (табл. 1). Це, очевидно, зумовлено високою адсорбційною здатністю отриманого коксу та особливостями процесу деструкції. Відповідно до здатності матеріалу займатися, поширювати полум'я по поверхні та виділяти тепло, розроблений матеріал відноситься до групи, що повільно поширюють полум'я по поверхні.

Однак до ПКМ, що використовуються для облицювання внутрішніх металевих поверхонь рухомого складу залізничного транспорту, висуваються дуже жорсткі вимоги не тільки по горючості, але і по ряду інших характеристик, пов'язаних з цим процесом. По-перше, ПКМ не повинні виділяти при горінні токсичних і подразнюючих дихальні шляхи речовин; по-друге, вони не повинні давати густий їдкий дим, який заважає орієнтуватися в палаючому приміщенні при пошуку шляхів порятунку. Тому для отримання важкогорючих полімерних мастик, що використовуються в замкнутому просторі, необхідні токсикологічні дослідження.

Токсикологічні дослідження мають на меті визначення показника токсичності HCL50, який характеризується тим, що він визначає кількість матеріалу на одиницю об'єму закритого простору, в якому утворюються газоподібні продукти, які призводять до смерті 50 % досліджуваних тварин (згідно з ДСТУ 8829:2019).

З табл. 2 видно, що найменше значення H_{CL50} спостерігається в режимі тління і становить 55,6 г/$м^3$ для розробленої мастики. Показано, що після затравки

піддослідних тварин газовими сумішами, які були отриманні шляхом спалювання зразків аналога на основі епоксидного олігомеру та розробленою епоксиуретановою мастикою, призвело до загибелі 50 % тварин, вміст HbCO в крові загиблих тварин становив 59,2–62,8 %. Отже, для всіх досліджуваних зразків полімерів, незалежно від їх хімічної природи та наявності антипіренів, головною токсичною дією продуктів згоряння є дія оксидів вуглецю. Відповідно до класифікації, згідно п.п. 6.16 ДСТУ 8829:2019 всі досліджувані матеріали віднесені до категорії помірнонебезпечних.

Гіпотеза дослідження стосовно оптимального підбору співвідношення олігомерів та наповнювачів для створення важкогорючої та віброзахисної мастики, що дозволить підвищити її вібродемпфуючі властивості та вогнестійкість для ефективного захисту структурних елементів вагонів, отримала своє підтвердження. При цьому, досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої віброзахисної мастики свідчить про перспективність її подальшого використання для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів залізничного рухомого складу з метою забезпечення їхньої пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Подальші дослідження в цьому напрямку можуть ґрунтуватися на більш детальному вивченню впливу наповнювачів різної природи (лускаті, сферичної форми), антипіренів, оптимізації співвідношення компонентів та підбір комплексу технологічних рішень при приготуванні та нанесенні мастики на структурні елементи вагонів. Загалом, розвиток цього дослідження може допомогти в розробці нових важкогорючих та віброзахисних матеріалів для широкого спектру застосувань, включаючи галузь автомобільного, морського та повітряного транспорту. У подальших дослідженнях важливо буде розглядати не лише властивості матеріалів, але й їхні експлуатаційні характеристики в реальних умовах застосування.

8. Висновки

1. Визначено вплив співвідношення реакційноздатних олігомерів та вогнезахисної добавки на в’язкопружні та демпфуючі властивості полімерної матриці. Встановлено, що композиції з епоксидним олігомером у кількості 20 мас.ч. характеризується найкращими показниками демпфуючої здатності (tgδ=0,97), тому з практичної точки зору цей склад був використаний в якості основи для створення вогне- та віброзахисної полімерної мастики. Показано, що введення антипірену та тиксотропного наповнювача в систему реакційноздатних олігомерів на основі олігоефірциклокарбонату марки Лапролат та епоксидіанового призводить до незначного підвищення температури склування (близько 3 °С), але сприяє зниженню механічних втрат на 33 % (від 0,97 до 0,65) порівняно з ненаповненими мастиками. У результаті динамічно-механічних та в’язкопружних досліджень встановлено, що розроблена епоксиуретанова мастика зі вмістом вогнезахисної добавки та тиксотропного наповнювача має високі демпфуючі властивості (tgδ=0,45–0,47) у високоеластичній області, а тому з практичної точки зору, цей розроблений матеріал може працювати як при низьких (від –60 °С), так і при помірних температурах (до +60 °С).

2. Проведено комплексну оцінку пожежної безпеки розробленої епоксиуретанової мастики. Встановлено, що розроблена мастика відноситься до групи важкогорючих матеріалів, з повільним поширенням полум’я, має помірну димоутворювальну здатність, за показником токсичності відповідає класу помірнонебезпечних. Досягнутий рівень характеристик розробленої важкогорючої віброзахисної

 © А. В. Скрипинець, Н. В. Саєнко, О. М. Григоренко, К. А. Афанасенко та ін.

мастики свідчить про перспективність її подальшого використання для облицювання внутрішніх металевих поверхонь кузовів залізничного рухомого складу з метою забезпечення їхньої пожежної безпеки та акустичного комфорту.

Література

1. Raja S., Tauseef S. M., Abbasi T., Abbasi S. A. Risk of fuel spills and the transient models of spill area forecasting. Journal of Failure Analysis and Prevention. 2018. Vol. 18. P. 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1

2. Zhang J., Ji W., Yuan Z., Yuan Y. Pyrolysis, combustion, and fire spread characteristics of the railway train carriages: A review of development. Energy and Built Environment. 2023. Vol. 4(6). P. 743–759. doi: 10.1016/j.enbenv.2022.07.001

3. Lattimer B. Y., McKinnon M. A review of fire growth and fully developed fires in railcars. Fire and Materials. 2018. Vol. 42(6). P. 603–619. doi: 10.1002/fam.2514

4. Irikovich Z. O., Vyacheslavovich R. R., Mahmod W. Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. International Journal of Engineering & Technology. 2020. Vol. 9(2). P. 378–381. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005

5. Jagadeesh P., Puttegowda M., Rangappa S. M., Siengchin S. Role of polymer composites in railway sector: an overview. Applied Science and Engineering Progress. 2022. Vol. 15(2). P. 5745–5745. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005

6. Andronov V. A., Bukhman O. M., Danchenko Y. M., Skripinets A. V. Efficiency of utilization of vibration-absorbing polimer coating for reducing local vibration. Науковий Вісник Національного Гірничого університету. 2014. (6). С. 85–91.

7. Wei Z., Xi Z., Zhuo-fu W. Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. Procedia Engineering. 2016. Vol. 135. P. 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147

8. Shcholokov E., Otrosh Y., Rashkevich N., Melezhyk, R. Simulation of human evacuation in case of fire using pathfinder software. Mechanics and mathematical methods. 2023. Vol. 2. P. 61–71 doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-61-71

9. Skripinets A., Saienko N., Hryhorenko O., Berezovskiy A. Development and Evaluation of the Possibility of Using Epoxyurethane Mastic in Railway Transport. In Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 273–281. Trans Tech Publications Ltd. URL: https://www.scientific.net/MSF.1006.273

10. Hohenwarter D. Experience Gained from Fire Tests According to EN 45 545-2 and DIN 5510-2 for Testing of Seats. Problemy Kolejnictwa. 2016. Z. 171. P. 27–38. URL: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-650169a0-2e94-41af-ac24-dd4776d03c48

11. Saienko N. V., Demidov D. V., Bikov R. A., Younis B. N. Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 708(1). 012103. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012103

12. Weibo H., Fengchang Z. Studies on the dynamic mechanical and vibration damping properties of polyether urethane and epoxy composites. Journal of applied polymer science. 1993. Vol. 50(2). P. 277–283. doi: 10.1002/app.1993.070500209

13. Plugin A. A., Plugin D. A., Pluhin O. A., Borziak O. S. The influence of the molecular structure of polyurethane on vibro- and electroinsulation properties of the tramway structures. in proceedings of cee 2019: Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. Springer International Publishing. 2020. P. 346–353. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27011-7_44

14. Skripinets A., Saienko N., Bikov R., Maladyka I., Saienko L. Study of viscoelastic properties of epoxyurethane compositions for vibration protection of metal products. AIP Conference Proceedings. 2023. Vol. 2684(1). 040024. doi: 10.1063/5.0133582

15. Skrypinets A. V., Danchenko Yu. M., Kabus O. V. A research on technological and physicochemical laws of manufacturing vibration-absorbing products based on epoxy-urethane polymer compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. № 3. 11(75). P. 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43324

16. Perez J. The study of polymer materials by mechanical spectrometry. Polymer Science. 1988. Vol. 40(1). P. 102–135.

17. Roderique J. D., Josef C. S., Feldman M. J., Spiess B. D. A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. Toxicology. 2015. Vol. 334. P. 45–58. doi: 10.1016/j.tox.2015.05.004

18. Hampson N. B. Carboxyhemoglobin: a primer for clinicians. Undersea Hyperb Med. 2018. Vol. 45(2). P. 165–171. URL: https://neilhampson.com/uploads/3/4/7/0/34704948/2018carboxyhemoglobin_primer_uhm.pdf

19. Tabian D., Bulgaru Iliescu D., Iov T., Barna B., Toma S. I., Drochioiu G. Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. Journal of forensic sciences. 2021. Vol. 66(3). P. 1171–1175. doi: 10.1111/1556-4029.14649

20. Özdemir A., Önder A. An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicle applications. Environ Sci Pollut Res. 2020. №. 27. P. 45076–45094. doi: 10.1007/s11356-020-10352-8

21. Zeltmann S. E., Prakash K. A., Doddamani M., Gupta N. Prediction of modulus at various strain rates from dynamic mechanical analysis data for polymer matrix composites. Composites Part B: Engineering. 2017. № 120. P. 27–34. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.062

22. Nashif A. D., Jones D. I. G., Henderson J. P. Vibration damping. John Wiley & Sons, 1991. 472 p.

23. Hryhorenko O., Saienko N., Lypovyi V., Harbuz S. Research of effectiveness of wood fire protection by modified epoxy polymers. In Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety. 2020. Vol. 9. P. 125–128. Springer International Publishing. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41235-7_19

***A. Skripinets*[1]**, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
***N. Saienko*[2]**, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
***O. Hryhorenko*[2]**, *PhD, Associate Professor of the Department*
***K. Afanasenko*[2]**, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
***O. Makarenko*[1]**, *PhD, Associate Professor of the Department*
[1]*O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine*
[2]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

USE OF FIRE- AND VIBRATION-PROTECTIVE MASTICS IN RAILWAY TRANSPORT

A difficult combustible epoxyurethane mastic with increased vibration-damping properties and the necessary physical and mechanical properties has been developed for lining internal metal surfaces of railway rolling stock. Epoxyurethane network polymers were used as a polymer matrix. To reduce flammability, the fire-retardant additive ammonium polyphosphate was used, and a filler with a hydrophobized surface was used to impart thixotropic properties Aerosil. Dynamic mechanical spectroscopy using a dynamic relaxometer was used as a method for studying viscoelastic properties. The

study of viscoelastic properties was carried out in the ultra-low frequency range of 0.7–1.0 Hz, which minimizes the effect of external mechanical influences on changes in the structure of the polymer matrix in the temperature range from –100 to +100 °C. It has been determined that compositions based on oligester cyclo-cab modified with an epoxy diane oligomer are characterized by the best damping capacity (tgδ=0.97). It has been established that the developed mastic composition containing a fire retardant and thixotropic additive has the highest damping capacity (tgδ=0.45–0.47) in the highly elastic region; this composition can be used as a vibration-absorbing material, operable at temperatures from –60 °C up to +60 °C. It has been established that the developed mastic belongs to the group of difficult combustible materials, with slow flame propagation, moderate smoke generating ability and are moderately hazardous in terms of toxicity. The achieved level of characteristics of the difficult combustible vibration damping mastic testifies about the prospects of its further use for facing the internal metal surfaces of bodies of railway rolling stock in order to ensure their fire safety and acoustic comfort.

Keywords: epoxyurethane mastic, viscoelastic researches, damping, fire safety, toxicity, railway transport

Referense

1. Raja, S., Tauseef, S. M., Abbasi, T., Abbasi, S. A. (2018). Risk of fuel spills and the transient models of spill area forecasting. Journal of Failure Analysis and Prevention, 18, 445–455. doi: 10.1007/s11668-018-0429-1

2. Zhang, J., Ji, W., Yuan, Z., Yuan, Y. (2023). Pyrolysis, combustion, and fire spread characteristics of the railway train carriages: A review of development. Energy and Built Environment, 4(6), 743–759. doi: 10.1016/j.enbenv.2022.07.001

3. Lattimer, B. Y., McKinnon, M. (2018). A review of fire growth and fully developed fires in railcars. Fire and Materials, 42(6), 603–619. doi: 10.1002/fam.2514

4. Irikovich, Z. O., Vyacheslavovich, R. R., Mahmod, W. (2020). Development of new polymer composite materials for the flooring of rail carriage. International Journal of Engineering & Technology, 9(2), 378–381. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005

5. Jagadeesh, P., Puttegowda, M., Rangappa, S. M., Siengchin, S. (2022). Role of polymer composites in railway sector: an overview. Applied Science and Engineering Progress, 15(2), 5745–5745. doi: 10.14416/j.asep.2022.02.005

6. Andronov, V. A., Bukhman, O. M., Danchenko, Yu. M., Skripinets, A. V. (2014). Efficiency of utilization of vibration-absorbing polimer coating for reducing local vibration. Naukovyy Visnyk Natsional′noho Hirnychoho universytetu, 6, 85–91.

7. Wei, Z., Xi, Z., Zhuo-fu, W. (2016). Experiment study of performances of fire detection and fire extinguishing systems in a subway train. Procedia Engineering, 135, 393–402. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.147

8. Shcholokov, E., Otrosh, Y., Rashkevich, N., Melezhyk, R. (2023). Simulation of human evacuation in case of fire using pathfinder software. Mechanics and mathematical methods, 2, 61–71 doi: 10.31650/2618-0650-2023-5-2-61-71

9. Skripinets, A., Saienko, N., Hryhorenko, O., Berezovskiy, A. (2020). Development and Evaluation of the Possibility of Using Epoxyurethane Mastic in Railway Transport. In Materials Science Forum, 1006, 273–281. Trans Tech Publications Ltd. Available at: https://www.scientific.net/MSF.1006.273

10. Hohenwarter, D. (2016). Experience Gained from Fire Tests According to EN 45 545-2 and DIN 5510-2 for Testing of Seats. Problemy Kolejnictwa, 171, 27–38. Available at: https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-650169a0-2e94-41af-ac24-dd4776d03c48

11. Saienko, N. V., Demidov, D. V., Bikov, R. A., Younis, B. N. (2019). Effect of mineral fillers on the wetting of water-based polymer dispersions. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708(1), 012103. URL: doi: 10.1088/1757-

899X/708/1/012103

12. Weibo, H., Fengchang, Z. (1993). Studies on the dynamic mechanical and vibration damping properties of polyether urethane and epoxy composites. Journal of applied polymer science, 50(2), 277–283. doi: 10.1002/app.1993.070500209

13. Plugin, A. A., Plugin, D. A., Pluhin, O. A., Borziak, O. S. (2020). The influence of the molecular structure of polyurethane on vibro- and electroinsulation properties of the tramway structures. in proceedings of cee 2019: Advances in resource-saving technologies and materials in civil and environmental engineering. Springer International Publishing, 346–353. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-27011-7_44

14. Skripinets, A., Saienko, N., Bikov, R., Maladyka, I., Saienko, L. (2023). Study of viscoelastic properties of epoxyurethane compositions for vibration protection of metal products. AIP Conference Proceedings, 2684(1), 040024. doi: 10.1063/5.0133582

15. Skrypinets, A. V., Danchenko, Yu. M., Kabus, O. V. (2015). A research on technological and physicochemical laws of manufacturing vibration-absorbing products based on epoxy-urethane polymer compositions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3, 11(75), 4–8. doi: 10.15587/1729-4061.2015.43324

16. Perez, J. (1988). The study of polymer materials by mechanical spectrometry. Polymer Science, 40(1), 102–135.

17. Roderique, J. D., Josef, C. S., Feldman, M. J., Spiess, B. D. (2015). A modern literature review of carbon monoxide poisoning theories, therapies, and potential targets for therapy advancement. Toxicology, 334, 45–58. doi: 10.1016/j.tox.2015.05.004

18. Hampson, N. B. (2018). Carboxyhemoglobin: a primer for clinicians. Undersea Hyperb Med, 45(2), 165–171. Available at: https://neilhampson.com/uploads/3/4/7/0/34704948/2018carboxyhemoglobin_primer_uhm.pdf

19. Tabian, D., Bulgaru Iliescu, D., Iov, T., Barna, B., Toma, S. I., Drochioiu, G. (2021). Hydrogen cyanide and carboxyhemoglobin assessment in an open space fire-related fatality. Journal of forensic sciences, 66(3), 1171–1175. doi: 10.1111/1556-4029.14649

20. Özdemir, A., Önder, A. (2020). An environmental life cycle comparison of various sandwich composite panels for railway passenger vehicle applications. Environ Sci Pollut Res, 27, 45076–45094. doi: 10.1007/s11356-020-10352-8

21. Zeltmann, S. E., Prakash, K. A., Doddamani, M., Gupta, N. (2017). Prediction of modulus at various strain rates from dynamic mechanical analysis data for polymer matrix composites. Composites Part B: Engineering, 120, 27–34. doi: 10.1016/j.compositesb.2017.03.062

22. Nashif, A. D., Jones, D. I. G., Henderson, J. P. (1991). Vibration damping. John Wiley & Sons, 472.

23. Hryhorenko, O., Saienko N., Lypovyi, V., Harbuz, S. (2020). Research of effectiveness of wood fire protection by modified epoxy polymers. In Wood & Fire Safety: Proceedings of the 9th International Conference on Wood & Fire Safety, 9, 125–128. Springer International Publishing. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-41235-7_19

Надійшла до редколегії: 07.03.2024
Прийнята до друку: 13.04.2024

 © А. В. Скрипинець, Н. В. Саєнко, О. М. Григоренко, К. А. Афанасенко та ін.