ISSN 2524-0226

ПРОБЛЕМИ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

2(38)2023

Content / Зміст

Basmanov O., Maksymenko M. Model for choosing optimal water flow rate for tank wall cooling 4
Невлюдов І. Ш., Янушкевич Д. А., Толкунов І. О., Попов І. І., Іванець Г. В. Обґрунтування необхідності створення робото-технічних комплексів для гуманітарного розмінування 17
Кустов М. В., Кулаков О. В., Карпов А. А., Басманов О. Є., Михайловська Ю. В. Модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечних предметах 39
Шахов С. М., Виноградов С. А., Рибка Є. О., Гарбуз С. В., Остапов К. М. Особливості визначення часу евакуації людей з будівель при пожежі 53
Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Криворучко Є. М., Рагімов С. Ю., Тригуб В. В. Особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії 69
Белюченко Д. Ю., Максимов А. В., Стрілець В. М., Бурменко О. А. Порівняльна оцінка різних варіантів проведення висотно-рятувальних робіт 80
Трегубов Д. Г., Трефілова Л. М., Слепужніков Є. Д., Соколов Д. Л., Трегубова Ф. Д. Співвідношення властивостей у гомологічних рядах вуглеводнів 96
Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини в умовах вітру 119
Калиновський А. Я., Куценко Л. М., Поліванов О. Г., Кривошей Б. І., Савченко О. В. Моделювання траєкторії доставки вогнегасного контейнера до верхніх поверхів будівель 136
Lysak N., Skorodumova O., Chernukha A. Development of a fire-proof coating containing silica for polystyrene 156
Попов О. О., Данілін О. М., Петухова О. А., Бородич П. Ю. Модель випадкових пульсацій теплового потоку випромінюванням від пожежі горючої рідини 168
Басманов О. Є., Савельєв Д. І., Мележик Р. С., Луценко Т. О. Алгоритм оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами 181
Коваленко Р. І., Назаренко С. Ю., Михлюк Е. І., Семків В. О. Статистичні закономірності виникнення пожеж в містах під час воєнного стану 194
Степанчук С. О., Стрілець В. М., Макаров Є. О., Стрілець В. В. Порівняльний кількісний аналіз особливостей гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості 208
Куценко Л. М., Сухарькова О. І., Савельєв Д. І., Коханенко В. Б., Журавський М. М. Геометричне моделювання вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю 224
Матухно В. В., Морщ Є. В., Корнієнко Р. В. , Вавренюк С. А. Скорочення часу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території 240
Поспєлов Б. Б., Мелещенко Р. Г., Безугла Ю. С., Ященко О. А., Мельниченко А. С., Самойлов М. О. Бікогерентність динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загораннях матеріалів 252
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 267
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 281
Лєвтєров О. А., Стативка Є. С. Оптимізація параметрів розміщення елементів акустичної системи орієнтування спорядження рятувальника 297

УДК 656.8+623.45+621.03+614.8+544.16+541.49+539.19+519.6+514.18+504.06+355+359+351.86+313.86

Проблеми надзвичайних ситуацій. Харків: НУЦЗ України, 2023. № 2(38). 310 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); **Васюков С. О.,** к.ф.-м.н., Національний інститут ядерної фізики, Рим (Італія); **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
№ 3 від 29.11.2023

Підписано до друку
29.11.2023

Формат 60x84/16
Папір 80 г/м^2
Ум. друк. арк. 16,8
Тираж 100 прим.
Вид. № 88/23

© Національний університет цивільного захисту України, 2023

UDC 656.8+623.45+621.03+614.8+544.16+541.49+539.19+519.6+514.18+504.06+355+359+351.86+313.86

Problems of Emergency Situations. Kharkiv: NUCD Ukraine, 2023. № 2(38). 310 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); **Vasiukov Sergii,** PhD, National Institute of Nuclear Physics, Roma (Italy); **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
№ 3 dated 29.11.2023

Signed for print
29.11.2023

Format 60x84/16
Paper 80 g/m^2
Condit. print. sheet. 16,8
Circulation 100 cop.
Publ. № 88/23

© National University of Civil Defence of Ukraine, 2023

UDK 519.6

O. Basmanov, *Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department (ORCID 0000-0002-6434-6575)*
M. Maksymenko, *Adjunct (ORCID 0000-0002-1888-4815)*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

MODEL FOR CHOOSING OPTIMAL WATER FLOW RATE FOR TANK WALL COOLING

In this paper, we have considered the problem of choosing the optimal water flow rate for cooling the tank wall with water in the event of a fire in the adjacent tank. The optimal water flow rate is understood as the minimal flow ensuring a sufficient level of cooling. The choice of the water flow rate is based on the solution of the thermal balance equation for the tank wall and the thermal balance equation for the water film. The model takes into account the radiant heat transfer between the flame, the tank wall, the environment and the internal space of the tank. The convective heat transfer from the tank wall to water and vapor-air mixture is also taken into account. Here, we have developed an algorithm for determining the optimal water flow for cooling the tank wall. Solving the problem of choosing the rate of the cooling water flow is reduced to the sequential solution of the problems to determine the temperature distribution along the tank wall and the water film. We have constructed the functional dependence of optimal water flow rate for tank cooling on the direction and velocity of the wind. The inclination of the flame by the wind towards the adjacent tank increases the relevant heat influx, which requires a greater intensity of cooling. On the contrary, when the direction of the wind is away from the adjacent tank, the heat flux decreases. At the same time, for wind velocity greater than a certain value, the heat flux decreases to such an extent that there is no more need to cool the walls of the adjacent tank. With the perpendicular direction of the wind, at certain velocity values, there is no need to cool the walls of the adjacent tank either. The obtained results can be used to determine the rate of water flow for cooling the tank wall in the event of a fire in an adjacent tank.

Keywords: tank fire, thermal influence of fire, heat transfer, water cooling, water flow rate

1. Introduction

Tanks and tank farms are the main facilities for storing oil and petroleum products. They make part of process flow designs for oil gathering and preparation facilities, trunk petroleum product pipelines, oil refineries, transshipment and distribution depots and other enterprises. The most common type of tanks are aboveground vertical steel tanks (VST) made of steel sheets. VSTs account for about 95 % of the global storage volume for oil and petroleum products in tank farms. Large amounts of combustible and flammable liquids accumulated on a relatively small area carry a high level of fire hazard. A fire in a tank or within its dike often leads to an escalating spread of fire [1]. According to [2], about 44 % of large-scale fires associated with a domino effect began with a fire in a tank or with a spill fire. Statistical analysis of domino accidents shows [3] that the most frequent causes are external events (31 %) and mechanical malfunctions (29 %). In total, 63 % of accidents are associated with large storage tanks, 35 % occurring at storage facilities, and 28 % at process plants. At the same time, accidents with a domino effect most often involved LPG and liquid hydrocarbons [4]. The reason for the escalating spread of fire is the heating of the steel structures of the adjacent tanks to the autoignition point of the stored product. This can lead to an explosion of the vapor-air mixture in the gas space of the tank or to fires at the breather vents. The situation of the first type occurs if the concentration of the petroleum product vapors in the gas space of the tank lies within the lower and upper concentration limits of flame propagation. The situation of the second type occurs if the concentration of vapors in the gas space exceeds the upper concentration limit of flame propagation.

© O. Basmanov, M. Maksymenko

Thus, the problem of the spread of fire to neighboring tanks as a result of the heat influx remains relevant.

2. Analysis of literary data and problem statements

In [5], turbulent combustion of heptane is simulated and compared against experimental data on its combustion in a 7,1 cm laboratory pool. Based on the fuel and the pool diameter, the inlet power is 4,0 kW. It is noted that under such conditions there is a significant radiant fraction of approximately 29 % caused by strong sooting propensity of the target pool fire. However, the influence of thermal radiation on the neighboring objects is not considered. In [6], an improved model of thermal radiation from a fire is introduced, based on the perception of a flame as a solid cylinder of fire. Based on experimental studies of oil burning in a tunnel and in an open space, an additional coefficient is introduced to align the predicted and test data. The disadvantage of the work is the binding of the coefficient to the specific experiment conditions and the difficulty of transferring it to other conditions. In [7], the effect of a 1 m crude oil pool fire and 30 m and 50 m diameter kerosene pool fires on adjacent tanks was investigated using a Fire Dynamics Simulator (FDS) environment. A conclusion was made about the possibility of a domino effect due to the heating of adjacent tanks to critical temperatures. The disadvantage of this research is the impossibility of generalizing the obtained results to other conditions.

A specific model is developed in [8], taking into consideration flame pulsations. The influence of the heat flux from the adjacent fire on the strength of the tank structures is studied. However, the consequences of heating steel structures to the self-ignition temperature of petroleum product vapors is not considered. In [9], a CFD model of a large LPG fire is built, the power of thermal radiation transferred to the liquid surface and to the environment is determined, which makes it possible to estimate the safe distances between the fire and adjacent objects. However, the protection of the objects exposed to thermal radiation is not considered in the paper. In [10], an FDS model of the thermal effect of a fire on an adjacent petroleum tank is built, and the zones of safe placement of fire-fighting assets are calculated. However, the obtained results are impossible to generalize to other cases.

In [11], an experimental and quantitative study is made of the liquid leaking from the tank and burning. However, the impact of the fire on the adjacent tank is not considered. In [12], the thermal effect of a fire in a tank on a similar adjacent tank with a petroleum product is studied. A model of the tank heating is built, taking into account the radiant heat transfer from the flame and the heated walls of the burning tank. The temperature distribution inside the tank wall is determined. However, the convective heat transfer is not studied in the paper. The model of thermal effect of the dike fire on the next tank is built in [13]. The model takes into account both the radiant and convective heat transfer. However, the paper does not address the case of a tank fire. The model of thermal effect of the tank fire on the adjacent tank is built in [14]. The model takes into account the inclination of the flame under the influence of the wind; however, the protection of the adjacent tank is not considered. In [15], a model of the thermal effect of a fire on a petroleum tank is built and the weakening of the shell material is studied. At the same time, the issue of protecting the tank is not addressed there as well. In [16], a two-zone model of the thermal effect of a flame on an adjacent petroleum is proposed. This paper takes into account the higher temperature of the lower part of the flame and lower temperature of its upper part. However, it also does not address the protection of

the adjacent tank being heated by the fire.

In [17], a model of the tank cooling with a water film flowing down the tank wall is constructed. The model takes into account convective heat transfer between the wall and the water film, radiant heat transfer from the flame and the environment, as well as radiant and convective heat transfer from the gas space of the tank. However, the selection of the water flow rate for cooling is not studied. In [18], the cooling of the tank with the help of fire monitors is considered, resulting in the heat balance equation for the tank wall and the flowing water film. At the same time, the steady-state temperature distribution providing the basis to determine the adequacy of the cooling water flow rate was not considered in the paper.

The analysis of the thermal effect models of tank fires on adjacent tanks proves that the problem of cooling adjacent tanks with water remains insufficiently studied. This, in turn, can lead to errors in estimating the required water flow rates for cooling the tank walls.

Thus, we identified an unsolved part of the problem of fire spreading to adjacent tanks due to heat flux as the lack of data on the rates of water flow to the tank walls to ensure adequate cooling.

3. The purpose and tasks of the research

The purpose of this research is to develop a model of the optimal water flow rate for cooling the tank wall in the event of a fire in a adjacent tank.

To achieve this goal, the following tasks must be solved:

– set the problem of optimal flow rate selection for cooling the tank wall, based on the heat balance equations;

– develop an algorithm for solving the problem of optimal flow rate selection for cooling the tank wall;

– solve the problem of optimal flow rate selection for cooling the tank wall for typical petroleum products.

4. Research materials and methods

The object of the research is the process of the vertical steel tank wall cooling with a water film in the event of a petroleum product fire in a similar adjacent tank. The main premise of this research is the uniform movement and thickness of the water film along the tank wall. The finite difference method was used to numerically solve the system of heat balance equations. The dichotomy method was used to find the optimal value of the cooling water flow rate. The computational algorithm was constructed in the Delphi (Community Edition) software environment. The calculations were carried out on the example of the fixed – roof RVS-10000 tank (diameter 28,5 m, height 18 m).

5. Results of building a model for the optimal cooling water flow rate

5.1. Setting the problem of the optimal water flow rate selection for tank cooling

Let us consider a crude oil fire in the RVS-10000 tank in the absence of wind. At a standard distance (21 m), there is another tank filled with petroleum product up to a level of 9 m. Therefore, the height of the wall above the level of the petroleum product shall be L=9 m. To estimate the thermal effect of the fire on the tank, we will use the model built in [17]. Fig. 1 shows the temperature distribution along the height of the tank wall in the part facing the fire and above the petroleum product level. Fig. 2 shows temperature distribution along the water film flowing down the wall. The initial temperature of the water supplied for cooling is taken as T_0=20 ºC.

© O. Basmanov, M. Maksymenko

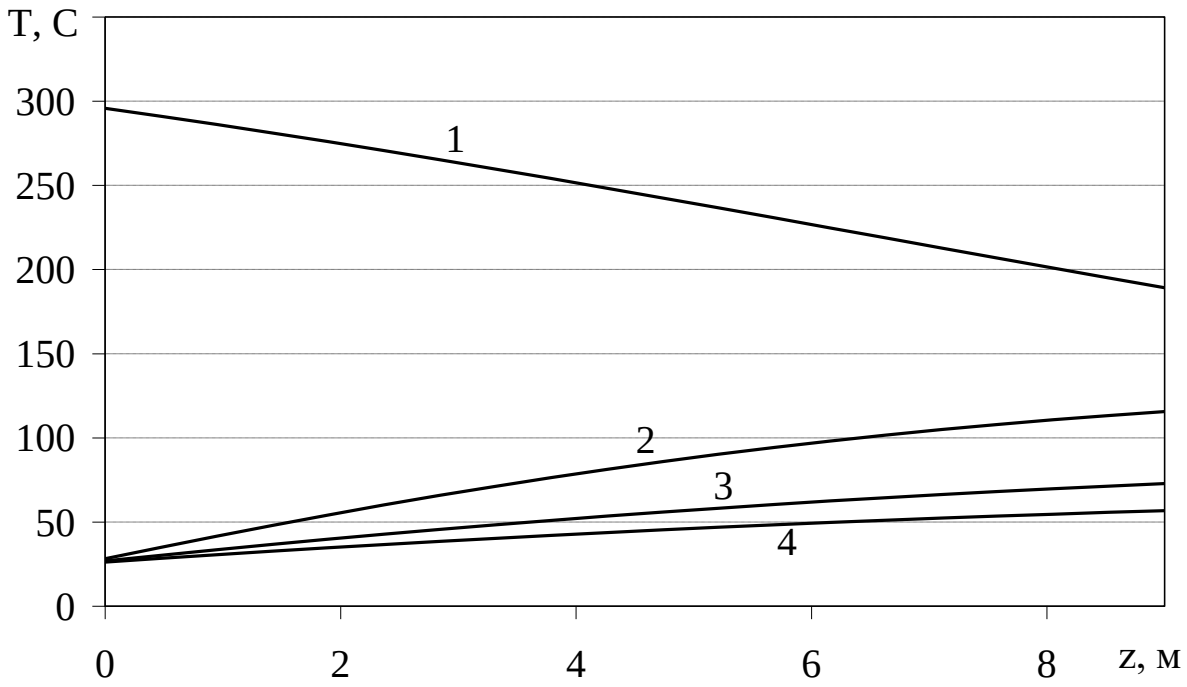


Fig. 1. Temperature distribution along the height of the RVS-10000 tank wall after 20 min. of exposure to the crude oil fire in a similar adjacent tank at different values of the cooling water flow rate: 1 – I=0; 2 – I=0,2 l/(m·s); 3 – I=0,4 l/(m·s); 4 – I=0,6 l/(m·s)

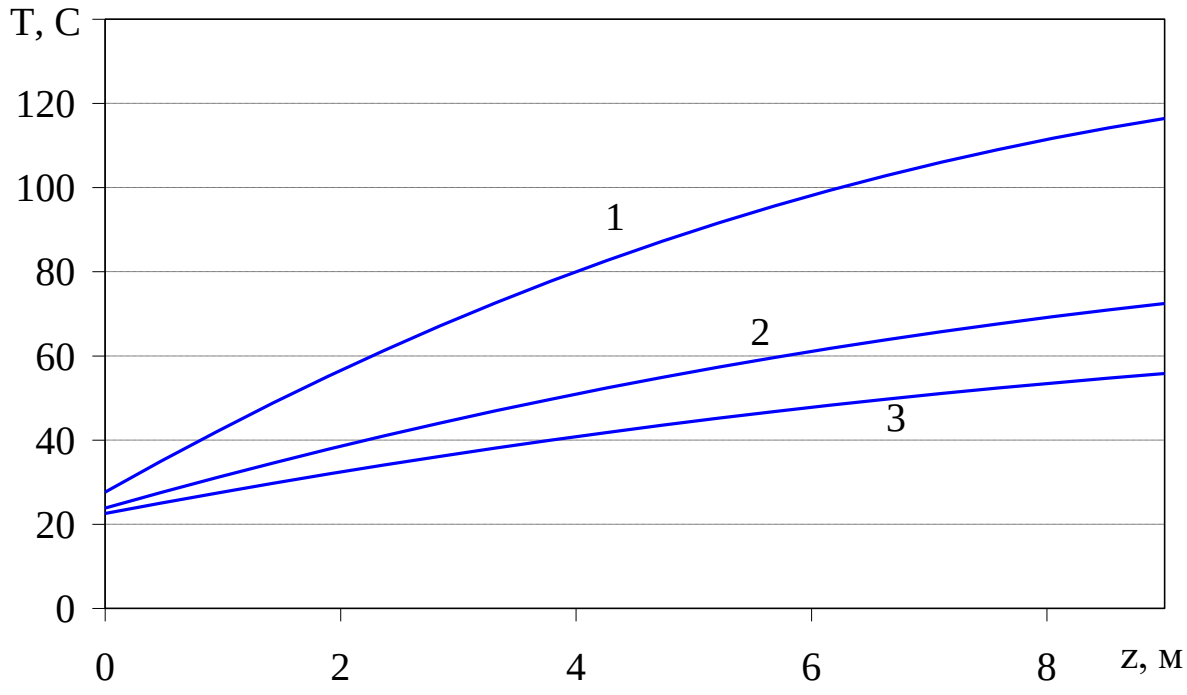


Fig. 2. Temperature distribution along the water film flowing down the wall of the RVS-10000 tank after 20 min. from the start of the crude oil fire in a similar adjacent tank at different values of the cooling water flow rate: 1 – I=0,2 l/(m·s); 2 – I=0,4 l/(m·s); 3 – I=0,6 l/(m·s)

The optimal water flow rate shall be understood as such a flow rate, which, on the one hand, ensures minimum water consumption:

$$I \rightarrow \min , \quad (1)$$

and on the other hand, ensures meeting the the following conditions:

- the wall temperature should not exceed the maximum permissible value $T_{out\ max}$

$$T^{*}_{out}(z_i) \le T_{out\ max}; \tag{2}$$

- the temperature of the water film should not exceed the maximum permissible value $T_{c\ max}$

$$T_c(z_i) \le T_{c\ max}. \tag{3}$$

The optimal water flow rate will be determined by the fulfillment of the conditions (2) and (3), which in turn depend on a number of factors:

- type of burning liquid;
- wind direction and velocity;
- petroleum product level in the heated tank.

The level of the product in the heated tank affects the height of the free wall above the level of the oil product. It is this part of the wall that needs cooling. The most challenging case in terms of cooling is a low level of the petroleum product, because then it is necessary to ensure the fulfillment of conditions (2), (3) along the entire height of the tank wall. According to the analysis made in [19], vertical steel tanks used to store crude oil and petroleum products with a volume of 1000 m^3 (RVS-1000) and more have a height of 12 m or 18 m.

The type of burning liquid determines the height of the flame, the temperature of the emitting surface of the flame and its emissivity factor. The inclination of the flame by the wind changes the irradiation coefficient between the flame and the adjacent tank, thereby affecting the heat flux density from the fire. The tank adjacent to the fire will need the most cooling when the wind is directed from the fire towards this tank.

In [14], it is shown that in a tank group of identical vertical steel tanks, with a capacity of up to 20,000 m^3, in dimensionless coordinates, the irradiation coefficient depends only on the type of burning liquid, direction and velocity of the wind, and does not depend on the capacity of the tanks. This means that for tank farms with the single tank capacity of up to 20,000 m^3, it is sufficient to carry out calculations for arbitrary tanks with heights of 18 m and 12 m.

Therefore, the input parameters for the problem of the optimal cooling flow rate selection are the following:

- type of burning liquid;
- height of the tank wall to be cooled (12 m or 18 m);
- wind velocity.

5.2. Algorithm for solving the problem of optimal cooling water flow rate selection

Let us denote as F(I) the difference between the maximum water temperature on the tank wall at a given flow rate I and the maximum permissible temperature $T_{c\ max}$ of the water flowing down the wall:

$$F(I) = \max_{z,\varphi} T_c(z,\varphi) - T_{c\ out}. \tag{4}$$

© O. Basmanov, M. Maksymenko

Then, the algorithm for solving the problem of optimal flow rate selection will be the following.

1. We set the maximum permissible error ε and the maximum permissible water temperature $T_{c\,max}$.

2. We choose such a value of the water flow I_b, which is guaranteed to provide cooling to the required level, for example, $I_b = 2$ l/(m·s).

3. We calculate the value

$$F_a = F(I_a);\ F_b = F(I_b).$$

4. If

$$|I_a - I_b| < \varepsilon,$$

then we go to step 9.

5. We calculate

$$I_c = \frac{I_a + I_b}{2};\ F_c = F(I_c). \tag{5}$$

6. If $I_c < 0$, then we suppose

$$I_b = I_c;\ F_b = F_c. \tag{6}$$

7. If $I_c > 0$, then we suppose

$$I_a = I_c;\ F_a = F_c. \tag{7}$$

8. If $I_c = 0$, then go to step 9, otherwise go to step 4.

9. The optimal flow rate is

$$I^* = \frac{I_a + I_b}{2}.$$

Thus, by executing the above algorithm we obtain the optimal value I^* for the water flow rate.

5.3. Solving the problem of optimal water flow rate selection for typical petroleum products

Fig. 3 shows the dependence of the optimal cooling water flow rate on the wind velocity for the crude oil fire in a similar adjacent tank. For the calculations, it was assumed that the tanks are at a distance of 0,75D from each other (D being the diameter of the tank); the wind is directed from the burning tank towards the adjacent one, which needs to be cooled. The temperature of the flame radiating surface and its emissivity factor were taken as T_f=1100 ºC, ε_f=0,85, respectively. The maximum permissible water temperature on the tank wall $T_{c\,max}$=95 ºC; the maximum error in determining the water flow rate is ε=0,001 l/(m·s). The decision about the need for cooling was made if the temperature of the tank surface exceeded $T_{out\,max}$=120 ºC.

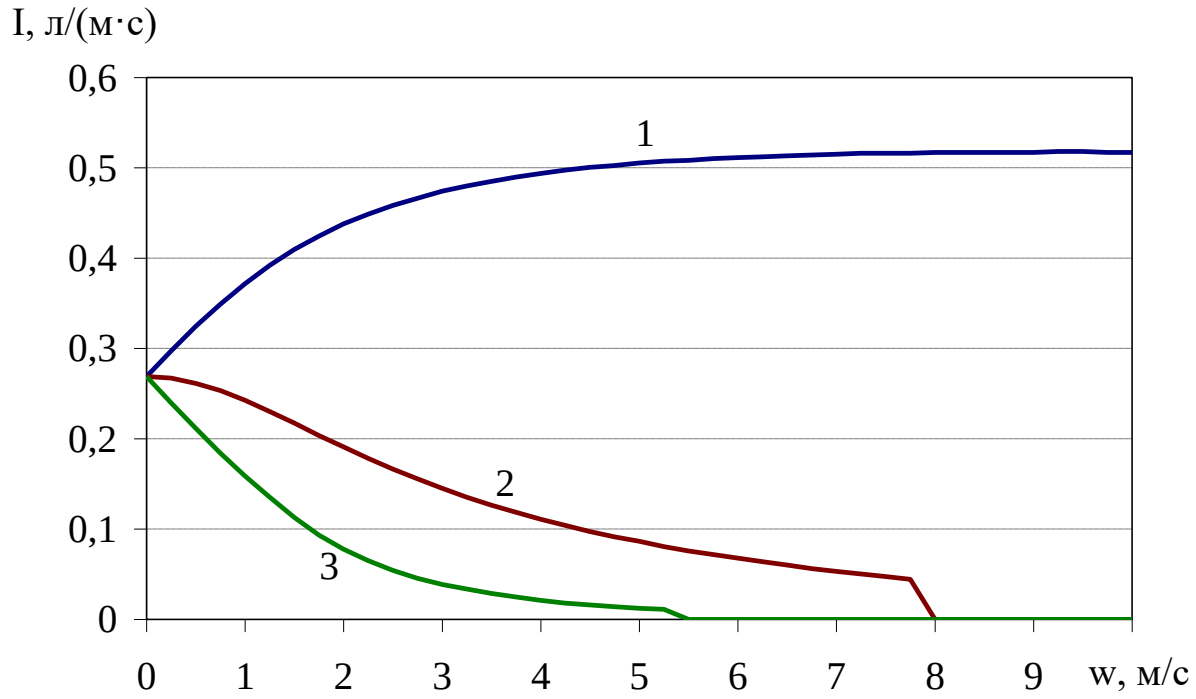


Fig. 3. Optimal water flow rate to cool the tank in the event of a crude oil fire in a similar adjacent tank, depending on the wind velocity: 1 – the wind is directed from the burning tank towards the adjacent one; 2 – the wind is directed perpendicular to the direction of the nearby tank; 3 – the wind is directed in the opposite direction from the adjacent tank

Fig. 4 shows the dependence of the optimal cooling water flow rate on the wind velocity for the gasoline fire in a similar adjacent tank. Here, the temperature of the flame radiating surface and its emissivity factor were taken as T_f=1200 ºC, ε_f=0,97, respectively.

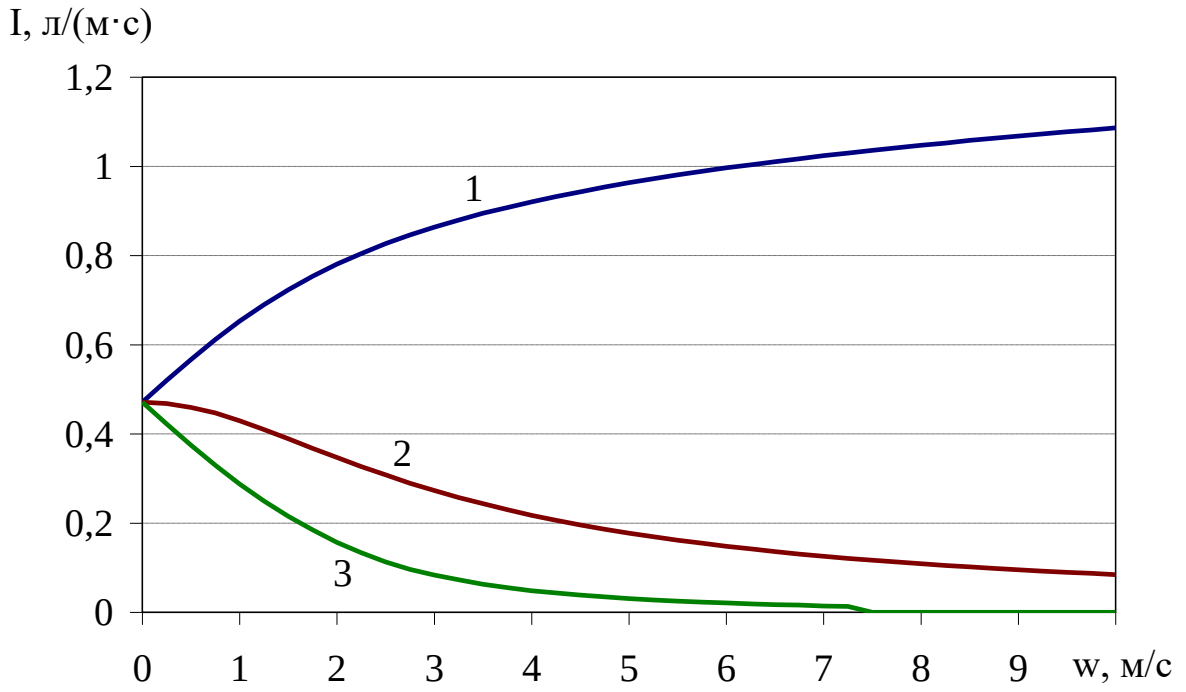


Fig. 4. Optimal water flow rate to cool the tank in the event of a gasoline fire in a similar adjacent tank, depending on the wind velocity: 1 – the wind is directed from the burning tank towards the adjacent one; 2 – the wind is directed perpendicular to the direction of the nearby tank; 3 – the wind is directed in the opposite direction from the adjacent tank

© O. Basmanov, M. Maksymenko

Fig. 5 shows the dependence of the optimal cooling water flow rate for the diesel fuel fire in a similar adjacent tank. The temperature of the flame radiating surface and its emissivity factor were taken as T_f=1100 ºC, ε_f=0,95, respectively.

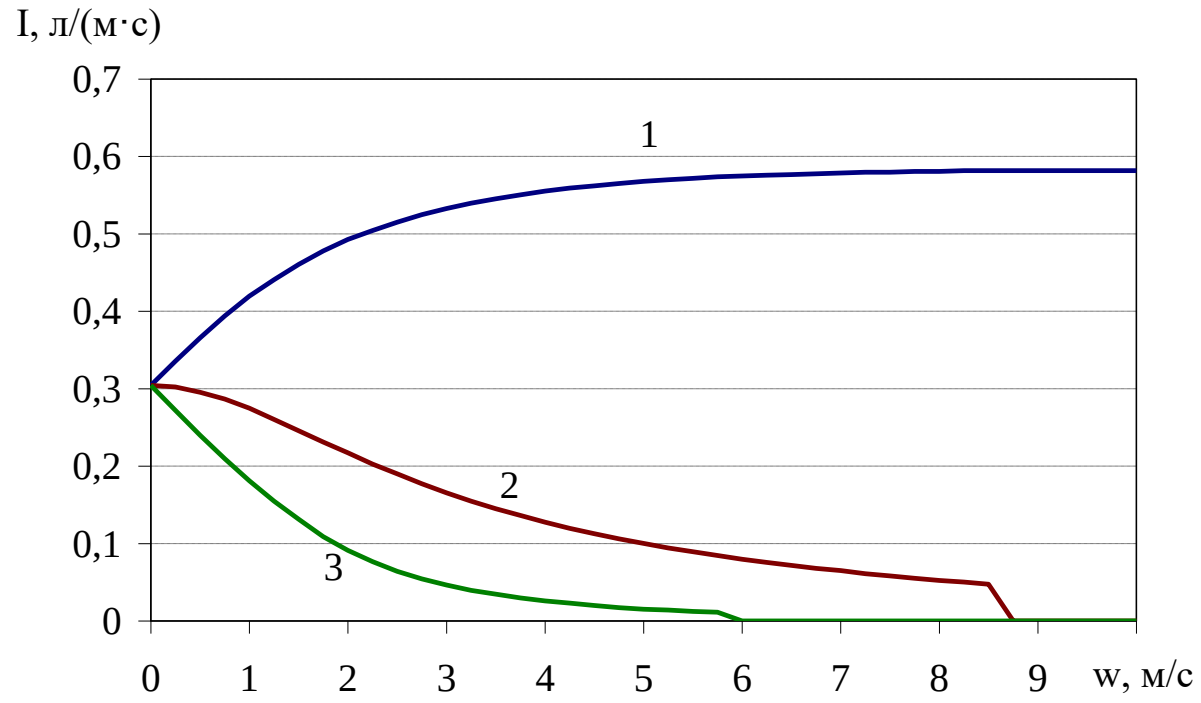


Fig. 5. Optimal water flow rate to cool the tank in the event of a diesel fuel fire in a similar adjacent tank, depending on the wind velocity: 1 – the wind is directed from the burning tank towards the adjacent one; 2 – the wind is directed perpendicular to the direction of the nearby tank; 3 – the wind is directed in the opposite direction from the adjacent tank

The lower temperature of the flame in a diesel fuel fire, as well as its shorter height compared to gasoline, result in a lower density of heat flux from the fire to the nearby tank. This, in turn, makes it possible to reduce the water flow rate for cooling the adjacent tank (Fig. 5).

6. Discussion of the results of building the optimal cooling water flow model

Equation (1) describes the temperature distribution at the midpoint of the tank wall exposed to the heat flux of a fire and being cooled by a water film flowing down the tank wall. Such a film can be formed by stationary cooling rings or by spraying water through a water cannon or fire monitors A, B. Boundary conditions (2), (3) together with the temperature distribution equation in the water film (4) take into account the radiant heat transfer from the flame and the environment, the convection heat transfer of the outer wall surface with the water film.

The analysis of graphical dependencies shown in Fig. 1 suggests that the greatest cooling effect occurs at the upper edge of the wall where the water enters. As water flows down the wall, its temperature rises (Fig. 2) and its cooling effect decreases. A comparison of the temperatures of the wall (Fig. 1) and of the water film on it (Fig. 2) shows the closeness of these values. From Fig. 2, it follows that at the flow rate of I=0,2 l/(m·s), the cooling water on the wall reaches the boiling temperature at a distance of $z_c \approx 6{,}2$ m from the upper edge of the tank. Boiling leads to the repulsion of the water film from the surface of the tank wall. As a result, the cooling efficiency decreases sharply. This means that

the lower part of the tank wall does not receive cooling and its temperature can reach the same values as in the absence of cooling – T_{out}=(190÷225) ºC (line 1 in Fig. 1). Therefore, water flow rate I=0,2 l/(m·s) is insufficient to cool this tank. At the flow rate of I=0,4 l/(m·s) or I=0,6 l/(m·s) such a problem is not observed – the water film does not reach the boiling temperature (lines 2, 3 in Fig. 2). Thus, cooling is sufficient in these cases.

It is advisable to choose the minimum value from the range of water flow rate values that are sufficient to meet cooling (conditions (6), (7)). Therefore, the optimization criterion takes the form of (5).

The problem of optimal water flow rate selection for tank cooling is the inverse of the problem of determining the temperature of the tank wall subjected to water cooling (8). This allows us to present the solution process as a sequence of direct problem solutions, leading to the water flow rate for cooling being obtained. The above algorithm is based on the dichotomy method. First, the temperature distribution is calculated in the absence of water cooling of the wall, and with a guaranteed sufficient flow rate (for example, 2 l/(m·s)). Then the temperature distribution at the average flow rate value (9) is calculated, which makes it possible to halve the search range – (10), (11). The process ends when the width of the range does not exceed the a priori given value ε. In particular, for the given conditions and ε=0,001, the execution of the given algorithm requires $\log_2 2000 \approx 11$ iterations.

The burning of gasoline is characterized by a higher flame, a greater emissivity factor of its surface, and a higher temperature compared to crude oil. This results in a higher heat flux density values to the adjacent tank. As a result, the required water flow rate for cooling the adjacent tank increases (Fig. 3, Fig. 4).

The inclination of the flame by the wind towards the adjacent tank increases the heat flux, which requires a greater intensity of cooling (Fig. 3 – Fig. 5). On the contrary, when the direction of the wind is away from the adjacent tank, the heat flux decreases. At the same time, for wind velocity values of any direction greater than a certain value (5,5 m/s for crude oil, 7,5 m/s for gasoline, 6 m/s for diesel fuel), the heat flux density decreases so much that the need to cool the walls of the adjacent tank disappears.

The inclination of the flame in a perpendicular direction from the adjacent tank leads to a decrease in the heat flux to the adjacent tank due to a decrease in the height of the flame and its deviation from the tank exposed to heating. This result qualitatively coincides with the conclusions given in [20]. At the same time, for wind velocity values greater than 8 m/s for crude oil and 8,5 m/s for diesel fuel, the heat flux density decreases so much that the adjacent tank does not need cooling.

The limitation of the constructed model is that it is based on the steady-state temperature behavior of the water film.

Prospects for further research are related to taking into account transient processes in the water film and building a non-stationary model of tank wall cooling.

7. Conclusions

1. We have formulated the problem of optimal flow rate selection for cooling the tank wall based on the heat balance equations. The optimal water flow rate is understood as such flow rate which minimizes water consumption, at the same time ensuring a sufficient level of tank cooling. In particular, in the event of a crude oil fire in steel tanks with a capacity of up to 20,000 m^3 and subject to regulatory distances between the tanks, with a cooling water flow rate of 0,2 l/(m·s), the water on the wall reaches the boiling temperature at a distance of 6,2 m from the upper edge of the tank, resulting in

© O. Basmanov, M. Maksymenko

sharp deterioration of the cooling performance. At flow rate of 0,4 l/(m·s), such a problem is not observed – the temperature of the water film and the walls does not exceed 80 ºC.

2. Here, we have developed an algorithm for determining the optimal water flow for cooling the tank wall. The above algorithm is based on the dichotomy method. For each iteration of the algorithm, the water flow range containing the optimal value decreases by a factor of 2. This means, that in order to determine the optimal flow rate with an error of no more than 0,001 l/(m·s), it is enough to perform 11 iterations, given that the width of the initial range does not exceed 2 l/(m·s).

3. The problem of choosing the optimal water flow rates for tank cooling has been solved on the examples of fires in adjacent tanks with crude oil, gasoline and diesel fuel. We have constructed the functional dependence of optimal water flow rate for tank cooling on the direction and velocity of the wind. The inclination of the flame by the wind towards the adjacent tank increases the relevant heat influx, which requires a greater intensity of cooling. On the contrary, when the direction of the wind is away from the adjacent tank, the heat flux decreases. At the same time, for wind velocity values of any direction greater than a certain value (5,5 m/s for crude oil, 7,5 m/s for gasoline, 6 m/s for diesel fuel), the heat flux density decreases so much that the need to cool the walls of the adjacent tank disappears. For the wind blowing at the perpendicular direction, and velocity values of more than 8 m/s for crude oil and 8,5 m/s for diesel fuel, there is no need to cool the walls of the adjacent tank either.

References

1. 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

2. Reniers, G., Cozzani, V. (2013). Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Elsevier, 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

3. Huang, K., Chen, G., Khan, F., Yang, Y. (2021). Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. Process Safety and Environmental Protection, 148, 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042

4. Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R., Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 29, 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003

5. Wu, B., Roy, S. P., Zhao, X. (2020). Detailed modeling of a small-scale turbulent pool fire. Combustion and Flame, 214, 224–237. doi: 10.1016/j. combustflame.2019.12.034

6. Shi, C., Liu, W., Hong, W., Zhong, M., Zhang, X. (2019). A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. Journal of Hazardous Materials, 379, 120801. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120801

7. 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

8. Li, Y., Jiang, J., Zhang, Q., Yu, Y., Wang, Z., Liu, H., Shu, C.-M. (2019). Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. Process Safety and Environmental Protection, 127, 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

9. Yi, H., Feng, Y., Wang, Q. (2019). Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 61, 262–274. doi: 10.1016/j.jlp.2019.06.015

10. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection, 46, 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

11. Wang, J., Wang, M., Yu, X., Zong R., Lu, S. (2022). Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. Process Safety and Environmental Protection, 159, 1203–1214. doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047

12. 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: 10.1051/matecconf/201824700040

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

14. Basmanov, O., Maksymenko, M. (2022). Modeling the thermal effect of fire to the adjacent tank in the presence of wind. Problems of emergency situations, 1(35), 239–253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

15. Wu, Z., Hou, L., Wu, S., Wu, X., Liu, F. (2020). The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. Fire Safety Journal, 117 (103192). doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103192.

16. 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

17. 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

18. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A., Yashchenko, O. (2019). Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Ecology, 1/10(97), 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

19. Fire Fighting Leader Handbook. (2017). Kyiv book and magazine factory, 2017, 320

20. Zhang, X., Hu, L., Wu, L., Kostiuk, L. W. (2019). Flame radiation emission from pool fires under the influence of cross airflow and ambient pressure. Combustion and Flame, 202, 243–251. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.015

О. Є. Басманов, *д.т.н., професор, голов. н.с. відділу*
М. В. Максименко*, ад'юнкт*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЬ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ПОДАЧІ ВОДИ НА ОХОЛОДЖЕННЯ СТІНКИ РЕЗЕРВУАРА

Розглянуто оптимальний вибір інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара водою в умовах пожежі в сусідньому резервуарі. Під оптимальною інтенсивністю подачі води розуміється така інтенсивність її подачі, яка мінімізує витрати води, забезпечуючи при цьому достатній рівень охолодження. Вибір інтенсивності подачі води спирається на розв'язання рівняння теплового балансу стінки резервуара і рівняння теплового балансу для водної плівки. Модель враховує теплообмін випромінюванням стінки з факелом, навколишнім середовищем і внут-

© O. Basmanov, M. Maksymenko

рішнім простором резервуара. Також враховано конвекційний теплообмін стінки з водою і пароповітряною сумішшю. Побудовано алгоритм визначення оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара. Розв'язання задачі вибору інтенсивності подачі води на охолодження зводиться до послідовного розв'язання задач визначення розподілу температур по стінці резервуара і водній плівці. Побудовано залежності оптимальної інтенсивності подачі води на охолодження резервуара від напряму і швидкості вітру. Нахил факела вітром в бік сусіднього резервуара збільшує щільність теплового потоку до нього, що потребує більшої інтенсивності охолодження. Навпаки, коли напрям вітру є протилежним напряму на сусідній резервуар, то щільність теплового потоку зменшується. При цьому для значень швидкості вітру більше певної величини щільність теплового потоку зменшується настільки, що зникає необхідність охолодження стінок сусіднього резервуара. При перпендикулярному напрямку вітру для певних значень швидкості необхідності в охолодженні стінок сусіднього резервуара також немає. Отримані результати можуть бути використані для визначення інтенсивності подачі води на охолодження стінки резервуара при пожежі в сусідньому резервуарі.

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

Література

1. 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

2. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Elsevier. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

3. Huang K., Chen G., Khan F., Yang Y. Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 148. P. 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042

4. Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R., Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 29. P. 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003

5. Wu B., Roy S. P., Zhao X. Detailed modeling of a small-scale turbulent pool fire. Combustion and Flame. 2020. Vol. 214. P. 224–237. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.12.034

6. Shi C., Liu W., Hong W., Zhong M., Zhang X. A modified thermal radiation model with multiple factors for investigating temperature rise around pool fire. Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 379. P. 120801. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.120801

7. 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

8. Li Y., Jiang J., Zhang Q., Yu Y., Wang Z., Liu H., Shu C.-M. Static and dynamic flame model effects on thermal buckling: Fixed-roof tanks adjacent to an ethanol pool-fire. Process Safety and Environmental Protection. 2019. Vol. 127. P. 23–35. doi: 10.1016/j.psep.2019.05.001

9. Yi H., Feng Y., Wang Q. Computational fluid dynamics (CFD) study of heat radiation from large liquefied petroleum gas (LPG) pool fires. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 61. P. 262–274. doi: 10.1016/j.jlp.2019.06.015

10. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 46. P. 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

11. Wang J., Wang M., Yu X., Zong R., Lu S. Experimental and numerical study

of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning. Process Safety and Environmental Protection. 2022. Vol. 159. P. 1203–1214. doi: 10.1016/j.psep.2022.01.047

12. Semerak M., Pozdeev S., Yakovchuk R., Nekora O., Sviatkevich O. Mathematical modeling of thermal fire effect on tanks with oil products. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 247(00040). doi: 10.1051/matecconf/201824700040

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

14. Басманов О.Є., Максименко М.В. Моделювання впливу пожежі на сусідній резервуар з нафтопродуктом в умовах вітру. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 1(35). С. 239–253. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-18

15. Wu Z., Hou L., Wu S., Wu X., Liu F. The time-to-failure assessment of large crude oil storage tank exposed to pool fire. Fire Safety Journal. 2020. Vol. 117(103192). doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103192.

16. Espinosa S. N., Jaca R. C., Godoy L. A. Thermal effects of fire on a nearby fuel storage tank. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2019. Vol. 62(103990). doi: 10.1016/j.jlp.2019.103990

17. 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

18. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Ecology. 2019. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

19. Довідник керівника гасіння пожежі. Київська книжково-журнальна фабрика, 2017. 320 с.

20. Zhang X., Hu L., Wu L., Kostiuk L. W. Flame radiation emission from pool fires under the influence of cross airflow and ambient pressure. Combustion and Flame. 2019. Vol. 202. P. 243–251. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.01.015

Надійшла до редколегії: 22.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

© O. Basmanov, M. Maksymenko

УДК 355:359

***І. Ш. Невлюдов*[1]**, *д.т.н., професор, зав. каф. (ORCID 0000-0002-9837-2309)*
***Д. А. Янушкевич*[1]**, *к.т.н., с.н.с., доц. каф. (ORCID 0000-0003-3684-518X)*
***І. О. Толкунов*[2]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5129-3120)*
***І. І. Попов*[2]**, *к.т.н., доцент, викладач каф. (ORCID 0000-0003-4705-4404)*
***Г. В. Іванець*[2]**, *к.т.н., доцент (ORCID 0000-0002-4906-5265)*
[1]*Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна*
[2]*Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна*

ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ СТВОРЕННЯ РОБОТО-ТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ

Проведено дослідження робото-технічних комплексів військового, спеціального або подвійного призначення, які застосовуються у системі гуманітарного розмінування. Визначено, що система гуманітарного розмінування передбачає виконання наступних завдань: обстеження об'єктів та місцевості, забруднених вибухонебезпечними предметами; їх пошук, дистанційна ідентифікація, знешкодження та знищення; картографування та маркування небезпечних територій тощо. У зв'язку з цим доведено, що для проведення гуманітарного розмінування доцільним буде використання робото-технічних комплексів спеціального призначення, які повинні бути оснащеними маніпуляторами та детекторами (сенсорами, датчиками), засобами прийняття рішень на всіх етапах виконання робіт. Розроблено математичну модель і керуючий алгоритм щодо очищення від вибухонебезпечних предметів території бойових дій з використанням робото-технічних комплексів, які реалізують принцип комплексного підходу до вирішення проблеми очищення територій України. Запропонована математична модель уявляє собою сукупність об'єднання взаємозв'язаних моделей: оцінки термінів вирішення проблеми очищення від вибухонебезпечних предметів території бойових дій, загальної кількості особового складу та технічного оснащення підрозділів для виконання поставлених завдань.За результатами дослідження запропоновано рекомендації щодо використання сучасних робото-технічних комплексів у гуманітарному розмінуванні та встановлено, що для підвищення ефективності виявлення вибухонебезпечних предметів доцільне комплексне використання різних методів пошуку в одному робото-технічному комплексі. Одним з найбільш перспективних методів є застосування комбінації електромагнітного, оптичного та механічного методів, а також розробка комплексів, здатних здійснювати пошук, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів не тільки на поверхні ґрунту, але і на певній глибині.

Ключові слова: гуманітарне розмінування, робото-технічний комплекс, нетехнічне та технічне обстеження територій, вибухонебезпечний предмет

1. Вступ

Всі воєнні конфлікти, які виникали за часи існування людства, супроводжувалися і на теперішній час супроводжуються широким застосуванням протиборчими сторонами різноманітних боєприпасів, частина з яких за різних причин могла не спрацьовувати за штатним призначенням та призвести до масштабного забруднення територій небезпечними залишками війн – вибухонебезпечними предметами (ВНП). Найбільшу небезпеку серед них представляють протипіхотні міни, касетні боєприпаси, запалювальні боєприпаси, що містять білий фосфор, хімічні боєприпаси та багато інших. Однією з проблем, з якою країни у всіх регіонах, де велись бойові дії або існують воєнні конфлікти, які були породжені міжнародними та міжнаціональними визвольними рухами (наприклад: Ірак, Сирія, Афганістан, колишня Югославія, а на сьогоднішній день найзабрудненішою територією є Україна), стикаються з проблемами гуманітарного розмінування.

Згідно зі звітом Міжнародного руху за заборону протипіхотних мін (International Campaign to Ban Landmines, ICBL) за 2020 рік, 2019-й рік став одним з найтрагічніших за рівнем смертності від вибухів мін в світі. Найбільше число смертей від розривів мін було зафіксовано в Афганістані, Колумбії, Іраку, Малі, Нігерії, Україні та Ємені. Третина (33 %) смертей від вибухів протипіхотних мін в 2019 р. була зафіксована в 55 країнах, що приєдналися до Оттавського договору. Вибухи протипіхотних мін в 2019 р. забрали не менше 2170 життів по всьому світу, ще 3357 осіб отримали поранення. Понад 80 % загиблих від вибухів мін – цивільні особи, 43 % з яких діти [1].

Наприклад, за роки воєнного конфлікту на території українського Донбасу, який почався у 2014 р., він перетворився на одну з найбільш насичених мінами й ВНП територій в світі. За оцінкою Організації Об'єднаних Націй (ООН), за роки війни тут заміновано 1,6 млн. га землі, з них 700 тис. на території, підконтрольній урядові України. Площа забруднених регіонів, що містять міни та ВНП, становить майже 7 тис. км^2 на підконтрольній території та орієнтовно 14 тис. км^2 на окупованих територіях Донецької, Луганської областей та Автономної Республіки Крим. На цих територіях може знаходиться близько 3,3 млн. протипіхотних мін та ВНП.

Оцінити ж наслідки повномасштабної агресії на територію нашої держави з боку російської федерації на даний момент не представляється можливим як з огляду на площі тимчасово окупованих територій, так і масовістю застосування різних видів озброєння – починаючи від стрілецької зброї і закінчуючи найпотужнішими авіаційними бомбами і крилатими ракетами різних типів. Скільки б не тривала ця ганебна «специальная операция», це тільки додає страждань людям та призводить до більш масштабного забруднення ВНП території нашої багатостраждальної країни, площа яких оцінюється на сьогодні величезними масштабами – до 300 тис. км^2. Рано чи пізно війна закінчиться та розпочнеться кропітка робота щодо гуманітарного розмінування забруднених територій, а розмінування цих територій, за різними оцінками, може тривати до кількох десятків років.

Гуманітарне розмінування – це заходи, які проводяться з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із ВНП, включаючи нетехнічне та технічне обстеження територій, забруднених ВНП, їх картографування, маркування, пошук, ідентифікація та знешкодження ВНП, здійснення оцінювання якості розмінування тощо.

Для здійснення гуманітарного розмінування характерним є зростання уваги до проблем створення робото-технічних комплексів та систем військового, спеціального та подвійного призначення (РКСП). Це обумовлюється намаганням усіх передових країн світу до збереження людського життя, в контексті якого використання РКСП дозволяє досягти позитивних результатів. Крім того, ця тенденція пояснюється стрімким розвитком новітніх технологій в інформаційній сфері, тобто «роботизація» різноманітних напрямів діяльності людини, зокрема, військової та рятувальної сфери, що відповідає змісту сучасних концепцій постіндустріального суспільства на базі концепції Industry 4.0.

Отже, проблема організації гуманітарного розмінування та забезпечення безпечної життєдіяльності населення на території України в умовах військового стану та у післявоєнний період є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Незважаючи на значну кількість наукових робіт із даної тематики, на сьогодні склалася тенденція розмежування зазначених питань [2].

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

Викладені вище проблеми, на думку фахівців, мають бути вирішені тільки в комплексі організаційно-технічних заходів, які в межах сучасного процесу трансформації в Збройних Силах та в інших силових структурах різних держав розділяються на дві окремі складові:

– використання мережно-центричної концепції ведення бойових дій;

– розвиток робото-технічних комплексів та систем військового, спеціального та подвійного призначення.

Дослідження по створенню РКСП проводяться в різних країнах світу. Так, США визнало, що застосування РКСП – один з найперспективніших напрямів розвитку військової справи. США можна вважати лідером не тільки розробок, а й практичного використання роботів, хоч багато зусиль нині здійснюють також Китай, Великобританія, Ізраїль, Туреччина й ін.

Сучасному стану та перспективам розвитку РКСП присвячена значна кількість досліджень. Останнім часом значного розвитку отримав напрямок використання РКСП в сфері гуманітарного розмінування. Авторами досліджень значна увага приділяється як розвитку базових носіїв (наземних, повітряних, підводних та надводних), так і вдосконаленню навісного обладнання (маніпуляторів, датчиків, сенсорів різноманітного призначення. Більшість дослідників йдуть по шляху створення РКСП з відкритою архітектурою, яка передбачає створення широкого переліку навісного обладнання для базових шасі з можливість швидкої заміни та модернізації, а також удосконалення існуючих його варіантів для військового, спеціального або подвійного використання, в тому числі і для гуманітарного розмінування.

В роботі [3] розглядаються існуючі варіанти датчиків, які використовуються в робототехніці для гуманітарного розмінування, однак не достатньо глибоко вивчаються питання комплексного їх використання для виконання широкого спектру завдань: обстеження об’єктів та місцевості, забруднених ВНП; пошуку, ідентифікації та знешкодження ВНП; картографування та маркування територій, забруднених ВНП; виконання завдань з дистанційного знешкодження та знищення ВНП; здійснення контролю якості гуманітарного розмінування.

В дослідженнях [4] структуроване та каталогізоване механічне обладнання для розмінування, що буде дуже корисним при практичній організації робіт з гуманітарного розмінування. Однак в той же час відсутні практичні рекомендації, які б враховували особливості його застосування в тих чи інших умовах, наближених до реальних.

Дослідження [5] присвячені розробці рекомендацій щодо застосування робото технічних комплексів в небезпечних умовах в ході ведення бойових дій та виконання інших особливих завдань, а питанням функціонального та математичного обґрунтування процесів гуманітарного розмінування приділяється недостатньо уваги.

Представлені в [6] результати досліджень стосуються розробці рекомендацій щодо технологій розмінування, які потрібні кінцевим користувачам робототехніки та механізованих засобів при гуманітарному розмінуванні. В той же час знову ж таки не вирішене питання комплексного підходу щодо використання РКСП при виконанні подібних завдань.

Авторами [7] проведено дослідження теоретичного та експериментального характеру, що стосуються розробки маніпуляторів для мобільних роботів спеціального призначення, адаптованих для роботи РКСП з небезпечними об’єктами, але не в повній мірі враховано конструктивні особливості ВНП різних типів.

Дослідження [8] присвячено удосконаленню методів пошуку мін та ВНП. Як показав аналіз цих досліджень, вони стосуються лише питань розробки та застосування РКСП для ведення бойових дій, боротьби з тероризмом, пошуку ВНП. В той же час невирішеною частиною розглянутої проблеми є питання комплексного застосування РКСП для здійснення окремих завдань з гуманітарного розмінування (пошук, ідентифікація, знешкодження ВНП).

В роботі [9] також розглянуто методи пошуку мін та ВНП, проведене теоретичне обґрунтування можливості застосування того чи іншого з них в умовах протидії терористичним загрозам та для пошуку ВНП. В той же час недостатньої уваги приділено можливості застосування РКСП для здійснення гуманітарного розмінування.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність математичного та алгоритмічного обґрунтування щодо застосування робототехнічних комплексів спеціального призначення для здійснення гуманітарного розмінування.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження вимог до робото-технічних комплексів військового, спеціального та подвійного призначення (включаючи маніпулятори, які у них застосовуються) та розроблення пропозицій щодо їх використання у гуманітарному розмінуванні.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

– дослідити робото-технічні комплекси військового, спеціального або подвійного призначення, які можуть застосовуватися у системі гуманітарного розмінування;

– розробити керуючий алгоритм і математичну модель щодо очищення від вибухонебезпечних предметів території бойових дій з використанням робототехнічних комплексів;

– надати рекомендації щодо використання сучасних робото-технічних комплексів у гуманітарному розмінуванні.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єкт дослідження – методологія та способи організації робіт з гуманітарного розмінування. Предмет дослідження – робото-технічні комплекси різного призначення та математичне обґрунтування можливості застосування технічних засобів різного призначення у визначеній кількості, в тому числі і РКСП, для вирішення завдань з гуманітарного розмінування, із урахуванням концепцій постіндустріального суспільства на базі концепції Industry 4.0.

Робоча гіпотеза полягала в тому, що ефективна реалізація методів і заходів гуманітарного розмінування може бути здійснена на основі формалізованої багатоетапної операції. Для перевірки цієї гіпотези проаналізовано існуючі методи щодо очищення (розмінування) територій, забруднених ВНП, та визначено етапи, на яких можуть бути застосовані РКСП різного призначення наявними (необхідними) силами піротехнічних підрозділів ДСНС України або інших залучених силових структур протягом визначеного (заданого) терміну. Це дозволило математично обґрунтувати та кількісно визначити необхідні сили, технічні засоби та часові показники для комплексного вирішення завдань із гуманітарного розмінування на території України в сучасних умовах та у післявоєнний період.

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

Комплексність підходу щодо використання РКСП в ході робіт з гуманітарного розмінування визначається необхідністю вирішення широкого переліку завдань, які включають наступні складові:

– нетехнічне (НТО) та технічне обстеження (ТО) територій, забруднених ВНП;

– пошук, ідентифікацію, знешкодження та знищення ВНП;

– картографування та маркування територій, забруднених ВНП;

– здійснення оцінювання якості розмінування тощо.

При цьому слід враховувати специфіку та конструктивні особливості окремих типів ВНП, їх призначення, порядок використання та просторове розташування після їх бойового застосування тощо.

Основні ідеї щодо оптимізації організаційних рішень при управлінні відповідними процесами гуманітарного розмінування враховує наступні припущення:

– процеси, які реалізуються в ході гуманітарного розмінування формалізуються у багатоетапну операцію, при цьому будь-який з етапів повинен бути максимально безпечним для людини-оператора (персоналу) та оточуючого середовища;

– планування багатоетапної операції повинно враховувати можливість втручання людиною-оператором РКСП на будь-якому з етапів з урахуванням усіх його майбутніх наслідків для наступних етапів, а результат, що досягається при реалізації плану операції з гуманітарного розмінування повинен бути максимально можливим.

Методи дослідження, зокрема методи статистичного та факторного аналізу, визначаються сукупністю вирішуваних завдань і базуються на принципах конструювання РКСП з відкритою архітектурою, яка дозволяє максимально оперативно підлаштовуватися під широкий комплекс завдань, що виконуються; включають методи аналізу та синтезу, які використані під час розроблення керуючого алгоритму та математичної моделі щодо очищення від ВНП території бойових дій з використанням робото-технічних комплексів, а також рекомендацій щодо планування та реалізації операцій з гуманітарного розмінування з використанням РКСП. Математичні розрахунки здійснювалися із використанням програмного продукту MatLab.

Для апробації отриманих результатів використовувалися методи спостереження та експертної оцінки, що дає змогу досягти максимально можливого результату із забезпеченням оптимального співвідношення між результативністю використання РКСП для операцій з гуманітарного розмінування та безпекою виконання цих робіт по відношенню до персоналу та оточуючого середовища.

Використання відмічених методів дослідження в ході розв’язання поставлених наукових завдань дозволило отримати наступні наукові результати.

5. Дослідження робото-технічних комплексів, які застосовуються у системі гуманітарного розмінування

Дослідження зроблені за методикою, яка представлена в роботах [10, 11].

Згідно міжнародного стандарту ISO 8373:2012 «Robots and robotic devices. Terms and definitions», робото-технічний комплекс (robot system) – це комплекс, що складається з одного або декількох роботів, їх робочих органів та будь-яких механізмів, обладнання, приладів або датчиків, що забезпечують виконання роботом функціонального призначення (завдання).

Створенням робото-технічних комплексів військового призначення активно займаються провідні країни світу, беручи за основу свої наукові, технічні та промислові накопичення [3, 12]. Створення РКСП потребує суттєвого опрацювання ядра найважливіших технологій, які необхідні для створення всієї номенклатури перспективних РКСП. При цьому типовий зразок РКСП може бути представлений у вигляді сукупності функціонально пов'язаних елементів. Зокрема [5, 6]:

1. Базовий носій – це може бути мобільна платформа, шасі чи корпус будь-якої конфігурації, призначені до застосування у різних середовищах.

2. Спеціалізоване навісне (вбудоване) обладнання у вигляді набору знімних модулів корисного (цільового) призначення.

3. Засоби забезпечення та обслуговування, що використовуються при підготовці до застосування та технічної експлуатації робота.

Склад спеціалізованого обладнання встановлюється, виходячи з функціонального призначення РКСП і може включати [5]:

– засоби розвідки;

– засоби озброєння;

– навігаційні пристрої;

– спеціальне технологічне обладнання;

– засоби телекомунікації;

– спеціалізовані обчислювачі та контролери із програмно-алгоритмічним забезпеченням;

– засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ);

– захисні засоби.

Крім цього, РКСП потребують забезпечення та обслуговування, тобто до складу комплексу додатково включаються [5]:

– пункт управління, контролю та обробки інформації;

– засоби доставки, транспортування та запуску;

– засоби спорядження, заправки та зарядки;

– засоби підготовки фахівців;

– комплект керівних документів;

– комплект запасного приладдя.

Таке уявлення типового РКСП дозволяє виділити технології для розробки перелічених елементів. Критичні технології робототехніки можна декомпозувати на:

– основні, тобто розроблювані безпосередньо для робото-технічних комплексів;

– допоміжні – розроблювані для широкої номенклатури зразків озброєння та перспективи застосування під час створення РКСП [5].

До основних можуть бути віднесені такі технології [3]:

– систем сприйняття та обробки сенсорної інформації, оцінки ситуації та планування поведінки;

– автоматичного наведення та управління;

– дистанційного та автономного управління рухом;

– автоматичного розпізнавання образів (цілей), аналізу ситуацій та динамічних сцен;

– штучного інтелекту та навчання;

– людино-машинного інтерфейсу;

– інтелектуальних систем групового керування.

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

До допоміжних можна віднести технології [5]:

– автоматизованого керування;

– створення та функціонування нових перспективних конструкцій;

– енергетики;

– створення та застосування нових матеріалів та речовин;

– геоінформаційні та точного глобального позиціонування;

– створення перспективних систем датчиків та їх елементів;

– створення оптичних та оптико-електронних засобів.

Володіння такими технологіями – запорука успіху у забезпеченні необхідного ступеня автономності та інтелектуальності безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних РКСП та автономних морських апаратів.

Використовуючи запропоновану співробітниками Оксфордського університету наочну класифікацію, можна систематизувати робото-технічні системи за чотирма поколіннями [10]:

1. «Рівень ящірки» – відповідає швидкодії процесорів універсальних роботів першого покоління, що становить від 3000 до 1 млн команд в секунду (MIPS). Основне призначення таких роботів – отримання та виконання лише одного завдання, яке програмується заздалегідь.

2. «Рівень миші» – роботи другого покоління, які можуть реалізовувати адаптивну поведінку, тобто навчання у процесі виконання завдань.

3. «Рівень мавпи» – роботи третього покоління, які будуються на основі процесорів від 10 млн. MIPS. Особливість таких роботів у тому, що для отримання завдання та навчання потрібен лише показ чи пояснення.

4. «Рівень людини» – четверте покоління роботів, яке повинно буде здатне мислити та приймати самостійні рішення.

Класифікація РКСП за ступенем їхньої залежності від оператора така:

1. Роботи 1-го покоління – це пристрої з програмним та дистанційним управлінням, здатні функціонувати тільки в організованому середовищі.

2. Роботи 2-го покоління – адаптивні, що мають синтетичні органи «чуття» та здатні функціонувати в заздалегідь невідомих умовах, та пристосовуватися до зміни ситуацій.

3. Роботи 3-го покоління – інтелектуальні, мають систему управління з елементами штучного інтелекту (створені поки лише у вигляді лабораторних макетів).

Інша класифікація РКСП передбачає їх поділ на три категорії [3]:

1. «Людина в системі управління» (human-in-the-loop) – до цієї категорії віднесені безпілотні машини, здатні самостійно виявляти цілі та здійснювати їх селекцію, проте рішення про їх знищення приймає тільки людина-оператор.

2. «Людина над системою управління» (human-on-the-loop) – до цієї категорії належать системи, здатні самостійно виявляти та вибирати цілі, а також приймати рішення на їх знищення, але людина-оператор, що виконує роль спостерігача, у будь-який момент може втрутитися та скоригувати чи заблокувати це рішення.

3. «Людина поза системою управління» (human-out-of-the-loop) – до цієї категорії віднесені роботи здатні виявляти, вибирати та знищувати цілі самостійно без людського втручання.

Сьогодні найбільш поширені РКСП першого покоління (керовані пристрої) та швидко удосконалюються системи другого покоління (напівавтономні пристрої). Для переходу до використання РКСП третього покоління (автономних пристроїв) фахівці розробляють систему самонавчання зі штучним інтелектом, в

якій будуть з'єднані можливості найпередовіших технологій в галузі навігації, візуального розпізнавання об'єктів, штучного інтелекту, озброєння, незалежних джерел живлення, маскування тощо.

Наймасовішим американським військовим роботом (випущено понад 3 тис. одиниць) є дистанційно-керована машина (ДКМ) «TALON», розроблена компанією Foster-Miller [13, 14] (рис. 1).

Рис. 1. Американський дистанційно керований робото-технічний комплекс «TALON»

Американські дослідники підрахували, що цей робот знешкодив більше 50 тис. вибухових пристроїв. «TALON» здатний діяти за будь-якої погоди та недостатнього освітлення, долати завали та дротяні загородження, пересуватися на місцевості зі складним рельєфом, функціонувати під водою на глибині.

Робот може виступати як шасі для розміщення на ньому різного спеціалізованого обладнання, завдяки якому може виконувати різні завдання на полі бою та в тилу. Стандартний робот «TALON» уявляє собою модульну систему, яка включає знімну руку маніпулятор з подвійним шарніром, довжиною 1,6 м.

Робот управляється за допомогою дуплексного радіозв’язку або по волоконно-оптичній лінії. Управління дистанційно керованої машиною «TALON» здійснюється оператором з пульта дистанційного керування оптоволоконним кабелем (але на дальності до 300 м) або по радіоканалу (до 800 м), а при використанні спрямованої антени дальність дії збільшується до 1200 м. Час безперервного функціонування дистанційного робота «TALON» у звичайному режимі становить 8,5 год. Бойова маса «TALON» 52-71 кг (залежно від комплектації). Швидкість ДКМ «TALON» коливається від максимальної 8,3 км/год до повзучої з можливістю безперервно працювати більше чотирьох годин. Бортове обладнання складається з денних та інфрачервоних камер, GPS-навігатора, датчиків, за допомогою яких визначаються вибухові та токсичні речовини, а також проводиться оцінка радіаційної, хімічної та біологічної обстановки, може нести на борту озброєння (кулемет М240 калібру 7,62 мм, снайперську гвинтівку М82А1, чотириствольну 66-мм ракетну установку М202, 40-мм гранатомети, багатоствольну Metal Storm»).

Пульт управління є кейсом, в якому також розміщений і блок живлення. Завдяки семи камерам, розташованим на борту, на екрані блоку управління безперервно відображається інформація для точного позиціонування машини. Шасі робота може нести на собі вантаж понад 90 кг для забезпечення максимальної

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

гнучкості у будь-якій ситуації.

Крім цих робото-технічних комплексів, найбільш розповсюдженими є такі РКСП [4]:

1. Гусенична роботизована міні-машина FirstLook 110 виробництва США (вага – 2,2 кг; розміри – 250×230×100 мм; обладнана 4 відеокамерами з підсвічуванням).

2. Військовий робот-розвідник Spybot виробництва Швейцарії. Робот SpyRobot випускається у двох варіантах – з шасі 4×4 та 6×6 (вага – 5 кг, розвідувальна апаратура включає теплові та оптичні датчики, а також радіолокаційну станцію із синтезованою апертурою). В результаті модернізації машини SpyRobot була створена дистанційно-керована платформа (ДКП) Dragon Runner [15] для розвідки місцевості в радіусі ефективної дальності стрільби стрілецької зброї (вага – 9 кг, розміри – 230×200×75 мм, обладнаний ІЧ-датчиками та відеокамерою).

3. Багатофункціональна платформа-робот Warrior 710 [16] виробництва США. Її основними завданнями є проведення розмінування, розчищення доріг, пожежогасіння, розвідка, віддалене спостереження за місцевістю, надання допомоги при надзвичайних ситуаціях, переміщення вантажів і проведення зварювальних робіт, а також евакуація поранених солдатів з-під вогню супротивника.

4. Гусеничний робот PackBot-510 виробництва США призначений для знешкодження вибухонебезпечних боєприпасів. PackBot може працювати з усією гамою ВНП та вирішувати проблеми утилізації звичайних боєприпасів. Його легка та надійна система маніпулятора OmniReach може розкладатися до двох метрів у будь-якому напрямку, щоб безпечно проникати у важкодоступні місця, де знаходяться саморобні вибухові пристрої, боєприпаси, міни та інші вибухонебезпечні предмети.

5. Наймініатюрніший робот-розвідник Recon Scout, який американські військові використовували в Афганістані. Він має вагу 1,3 кг та довжину 200 мм, обладнаний звичайною й інфрачервоною камерами. Цього робота можна закидати за перешкоди [3].

Також розробкою РКСП займаються і в Україні [7, 17]. До основних розробників робототехнічних комплексів військового призначення в Україні відносяться:

1. Львівська приватна компанія Roboneers (Global Dynamics) розробляє роботизовану, дистанційно керовану платформу з гібридним приводом у двох основних версіях – Hound і Ironclad.

2. Київське приватне акціонерне товариство «Кузня на Рибальському» розробило роботизований комплекс «Піранья» на гусеничній платформі.

3. Запорізька компанія «Infocom Ltd» розробила роботизовану конструкцію «Ласка 2.0», призначену для патрулювання, розвідки, розмінування, доставки боєприпасів та евакуації поранених. Крім того, ця компанія розробила автоматичну роботизовану турель «Страж», основним призначенням якої є захист периметру, що охороняється (державний кордон, важливі об’єкти, військові частини тощо), від несанкціонованого доступу.

4. Національний університет «Львівська політехніка» створив мобільні роботизовані платформи МРП-05 «Борсук» гусеничній платформі з електромеханічним приводом та МРП-07 «Кубик» на колісній платформі (6×4), ці платформи призначені для здійснення інспекційних перевірок території, моніторингу довкілля або для виконання спеціальних завдань.

5. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського» є розробником багатофункціонального робота високої прохідності для надзвичайних ситуацій.

6. Київська приватна компанія «Конструкторське бюро «Роботікс» (Robotics) розробила та провела випробування роботизованого спостережно-вогневого комплексу «Мисливець», який створений на базі дистанційно керованої платформи.

Усі перелічені вище розробки роботів знаходяться на різних стадіях життєвого циклу продукції: проектування, виготовлення або випробувань.

6. Розробка керуючого алгоритму та моделі очищення територій від вибухонебезпечних предметів

На звільнених територіях та в післявоєнний час нагальною проблемою буде виявлення, знешкодження та знищення ВНП на територіях, де велись бойові дії. Очищення (розмінування) місцевості від ВНП є складним і трудомістким завданням, що потребує чіткого планування та організації проведення робіт при знешкодженні і знищенні боєприпасів, що не вибухнули. При цьому необхідний обґрунтований підхід щодо матеріально-технічного забезпечення, підготовки відповідних спеціалістів за різним фахом, часові розрахунки термінів проведення робіт і т.ін.

Перше та дуже важливе завдання, яке виникає в ході очищення від ВНП імовірно небезпечних територій (ІНТ), площею $S_{ІНТ}$ – це нетехнічне та технічне обстеження цих територій, що, за результатами отримання непрямих та прямих доказів, дає можливість розподілити (класифікувати) загальну площу на дві категорії – підтверджено небезпечні території (ПНТ) площею $S_{ПНТ}$, забруднені ВНП, та виключені або зменшені території (ВТ та ЗТ, відповідно) площею $S_{В(З)Т}$, на яких гарантовано відсутні ВНП (рис. 2).

З огляду на це запропонована функціональна модель, яка уявляє собою керуючий алгоритм, що описує процеси очищення території України, які знаходилися в зоні безпосередніх бойових дій, піддавались артилерійським, мінометним, ракетним та іншим обстрілам або можуть бути заміновані, чи мати ВНП, які не вибухнули з тієї чи іншої причини та підлягають очищенню (розмінуванню) від ВНП.

Другим завданням для вирішення проблеми забезпечення безпеки життєдіяльності на територіях, забруднених ВНП – є проведення очищення (розмінування) місцевості від ВНП. Для виконання цих завдань у визначені (або задані) терміни необхідно визначити кількість персоналу, а також техніки для оснащення підрозділів, які проводитимуть обстеження та очищення (розмінування) забруднених територій.

Всі процеси у запропонованій функціональній моделі, заплановані у вигляді багатоетапної операції, є динамічними та взаємопов’язаними, що дозволяє оперативно реагувати на зміни ситуації. Модель дозволяє враховувати можливість втручання керівником робіт, виконавцями робіт, наприклад, людиною-оператором РКСП, на будь-якому з етапів операції з очищення (розмінування) територій з урахуванням усіх майбутніх наслідків втручання для наступних етапів, а результат, що досягається при реалізації плану операції з гуманітарного розмінування, якість реалізації якої повинна бути максимально можливою.

За результатами проведених досліджень та відповідних розрахунків було запропоновано математичну модель щодо очищення від вибухонебезпечних предметів територій бойових дій та забезпечення безпеки життєдіяльності населення на них, яка дозволяє оцінити термін вирішення цієї проблеми та загальну кількість особового складу і необхідну загальну кількість технічного оснащення для виконання поставлених (визначених) завдань.

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

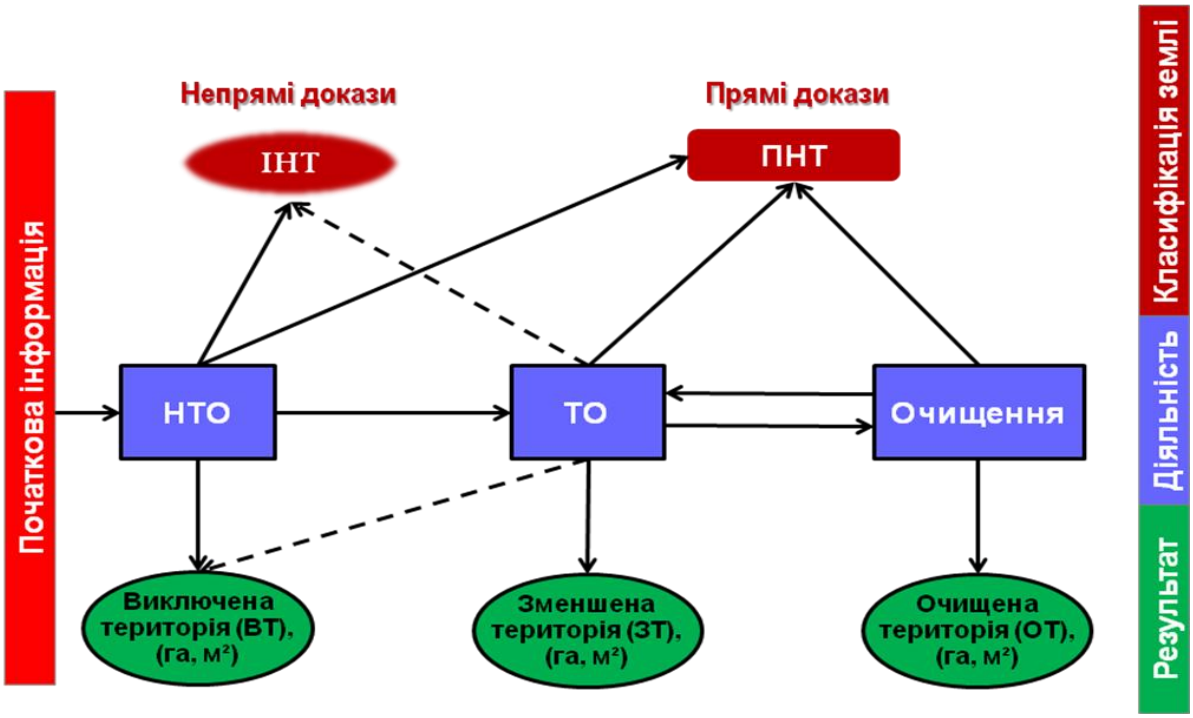


Рис. 2. Керуючий алгоритм, який описує процеси обстеження та очищення (розмінування) територій, забруднених ВНП

З урахуванням працездатності підрозділів щодо проведення робіт з обстеження та очищення (розмінування) забруднених ВНП територій, загальний термін вирішення проблеми забезпечення безпеки життєдіяльності населення на цих територіях, буде складати:

$$T_{ЗАГ} = t_{обст} + t_{очищ} = \frac{S_{ІНТ}}{n \cdot S_{ІНТО}} + t_1 + \frac{S_{ПНТ}}{n \cdot S_{ПНТО}} + t_2, \quad (1)$$

де $T_{ЗАГ}$ – загальний термін вирішення проблеми забезпечення безпеки життєдіяльності населення на територіях, забруднених ВНП, год. (днів, років); $t_{обст}$ – термін обстеження визначеної території $S_{ІНТ}$, год. (днів, років); $t_{очищ}$ – термін очищення визначеної території $S_{ІНТ}$, год. (днів, років); $S_{ІНТ}$ – площа імовірно небезпечної території, яка підлягає обстеженню, м^2; n – кількість груп обстеження; $S_{ІНТ0}$ – площа територія, яку здатна обстежити одна група обстеження, м^2; t_1 або t_2 – кількість неробочих або несприятливих для виконання робіт днів на протязі терміну обстеження або очищення визначеної території, відповідно; $S_{ПНТ}$ – площа підтверджено небезпечної території, яка підлягає очищенню, м^2; k – кількість піротехнічних груп; $S_{ПНТ0}$ – площа території, яку здатна очистити одна піротехнічна група за день, м^2.

Загальна кількість особового складу, в тому числі операторів РКСП, який буде задіяний для вирішення завдань щодо обстеження та очищення територій буде складати:

$$N_{ЗАГ} = N_{обст} + N_{очищ} = 1{,}1 \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^{l} n_{ni} + k \cdot \sum_{j=1}^{r} n_{kj} \right), \quad (2)$$

де $N_{ЗАГ}$ – загальна кількість особового складу задіяна для виконання робіт, чол.; $N_{обст}$ – кількість особового складу, задіяного для обстеження територій, чол.;

$N_{очищ}$ – кількість особового складу, задіяного для очищення територій, чол.; 1,1 – коефіцієнт, який враховує резервну кількість спеціалістів, визначається на основі досвіду експертним шляхом і складає близько 10 % від необхідної кількості задіяного особового складу для виконання робіт; n_{ni} – кількість спеціалістів і-го фаху в одній групі обстеження, чол.; l – кількість типів спеціалістів в одній групі обстеження; n_{kj} – кількість спеціалістів j-го фаху в одній піротехнічній групі, чол.; r – кількість типів спеціалістів в одній піротехнічній групі.

Загальна кількість технічного оснащення, в тому числі РКСП, для вирішення завдань щодо обстеження та очищення територій від ВНП буде складати:

$$M_{ЗАГ} = M_{обст} + M_{очищ} = 1{,}1 \cdot \left(n \cdot \sum_{i=1}^{q} m_{ni} + k \cdot \sum_{j=1}^{g} m_{kj} \right), \quad (3)$$

де $M_{ЗАГ}$ – загальна кількість техніки, задіяної для виконання робіт, од.; $M_{обст}$ – кількість техніки, задіяної для обстеження територій, од.; $M_{очищ}$ – кількість техніки, задіяної для очищення територій, од.; 1,1 – коефіцієнт, який враховує резервну кількість техніки, визначається на основі досвіду експертним шляхом і складає близько 10% від необхідної кількості задіяної техніки для виконання робіт; m_{ni} – кількість техніки і-го типу в одній групі обстеження, од.; q – кількість типів техніки в одній групі обстеження; m_{kj} – кількість техніки j-го типу в одній піротехнічній групі, од.; g – кількість типів техніки в одній піротехнічній групі.

Розроблений керуючий алгоритм, який реалізує запропоновану математичну модель щодо очищення (розмінування) територій бойових дій від ВНП та забезпечення безпеки життєдіяльності населення на них, передбачає виконання наступних процедур: збір та обробку попередньої інформації про території, які підлягають нетехнічному та технічному обстеженню на наявність ВНП; збір та обробку інформації про укомплектованість піротехнічних підрозділів технікою та обладнанням, наявність технічного оснащення; збір та обробку інформації про кількість піротехнічних підрозділів та укомплектованість спеціалістами за різним фахом; аналіз інформації про площі території для обстеження на наявність ВНП; аналіз інформації про укомплектованість піротехнічних підрозділів технікою і обладнанням, наявність технічного оснащення; аналіз інформації про кількість піротехнічних підрозділів та укомплектованість спеціалістами за різним фахом; визначення площі території для обстеження на наявність ВНП та часу для проведення НТО та ТО; оцінка необхідної кількості технічного оснащення для проведення НТО та ТО, включаючи і РКСП; оцінка необхідної кількості груп для проведення НТО та ТО й кількості спеціалістів за різним фахом; оцінка інформації про загальний термін вирішення проблеми забезпечення безпеки життєдіяльності населення на територіях, загальну кількість особового складу, технічного оснащення для виконання робіт та формування рішення щодо дій піротехнічних підрозділів; реалізація дій піротехнічних підрозділів, оцінки ефективності і корегування рішень на основі аналізу дій піротехнічних підрозділів.

В разі необхідності модель дозволяє вирішувати і обернену задачу: на основі конкретного або заданого терміну вирішення поставленої проблеми оцінити необхідну загальну кількість особового складу та необхідну загальну кількість технічного оснащення для виконання робіт у відведений термін.

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

7. Рекомендації щодо використання сучасних робото-технічних комплексів у гуманітарному розмінуванні

Як показали дослідження, система гуманітарного розмінування має містити такі підсистеми [4]:

– нетехнічне та технічне обстеження територій, забруднених ВНП;

– пошук, ідентифікацію, знешкодження та знищення ВНП;

– картографування та маркування територій, забруднених ВНП;

– здійснення оцінювання якості розмінування тощо.

Складові системи гуманітарного розмінування із застосуванням робототехнічних систем [11], наведені на рис. 3, включають:

– технічні засоби, в тому числі РКСП;

– технології гуманітарного розмінування;

– системи прийняття рішень;

– системи проведення розвідки (дані аерофоторозвідки, дані опитування та зовнішньої розвідки);

– системи пошуку, локації (топографічної прив'язки) ділянок місцевості, забруднених ВНП;

– маркування та картографування місцевості, забруднених ВНП;

– ідентифікацію ВНП;

– розробку стратегії прийняття рішень, яка включає оцінку рівня загрози та прийняття рішень щодо знищення, утилізації або знешкодження ВНП;

– контроль якості гуманітарного розмінування ділянок місцевості, забруднених ВНП.

Пошук та ідентифікація ВНП для гуманітарного розмінування є комплексним завданням. РКСП для проведення гуманітарного розмінування повинні бути оснащені відповідними маніпуляторами та детекторами (сенсорами, датчиками), засобами прийняття рішень та застосовуватись на етапах розвідки, пошуку, локації, маркування, ідентифікації, знешкодження та знищення ВНП.

Виявлення ВНП означає їх пошук, зумовлений факторами, до яких відносяться [8]:

– наявність вибухової речовини та локально розташованої маси металу;

– специфічна форма мін, фугасів та ВНП;

– неоднорідності середовища, де розміщений ВНП (порушення поверхні ґрунту, дорожнього покриття, порушення кольору рослинності або снігового покриву тощо).

Додаткові демаскуючі фактори:

– наявність ліній управління та антени для радіоприймальних пристроїв ВНП;

– наявність годинникового механізму або електронного таймера, розміщених на ВНП;

– наявність сейсмічного, магнітного або оптичного датчика.

Таким чином, міна або ВНП можуть виявлятися за рахунок таких факторів:

– наявності зосередженої маси вибухової речовини;

– конструкції міни або ВНП (специфічна форма, матеріал, із якого виготовлений корпус);

– неоднорідність оточуючого середовища (колір рослинності, щільність ґрунту тощо).

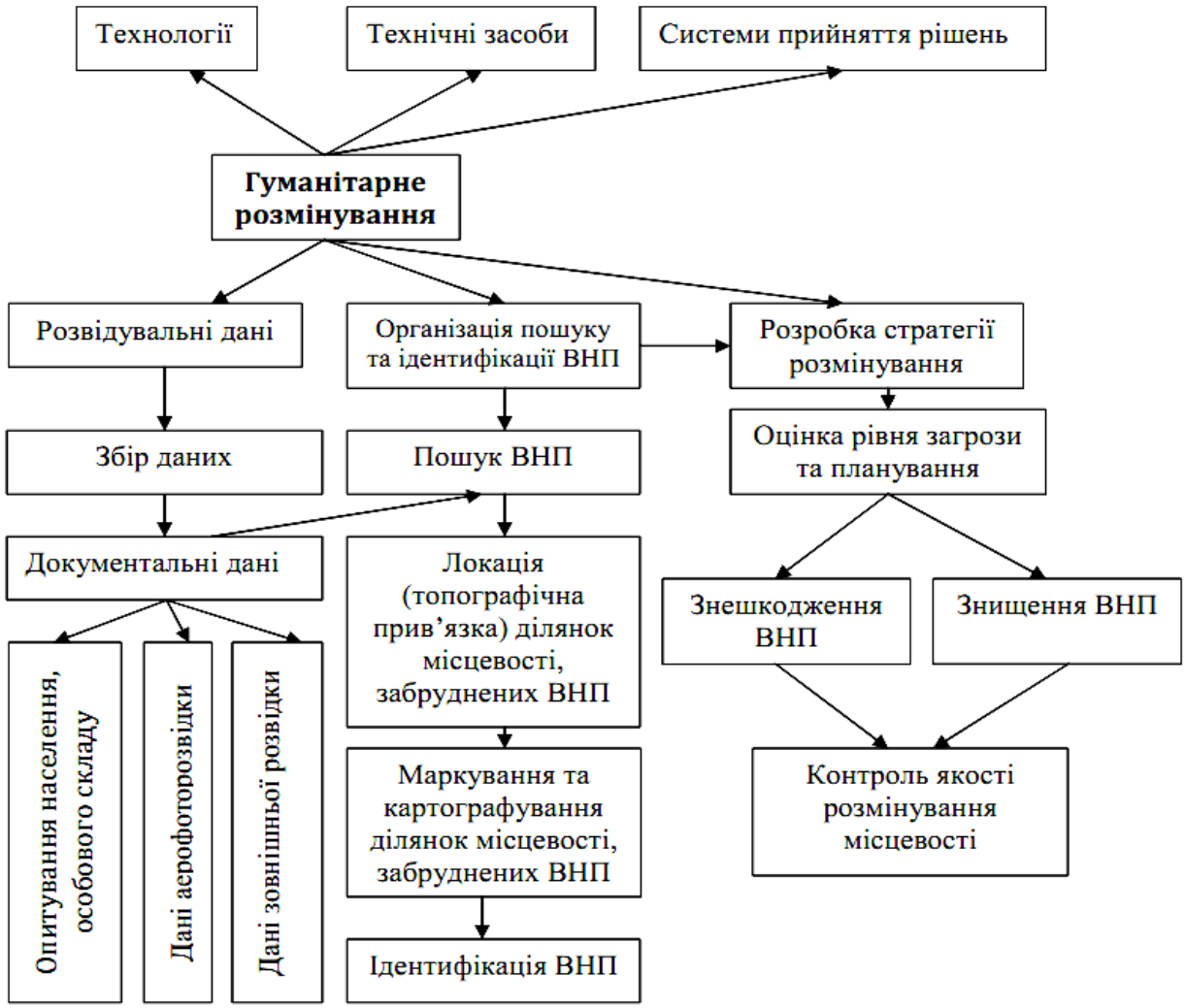


Рис. 3. Складові системи гуманітарного розмінування

Пошук мін та ВНП має здійснюватися за двома напрямками:

1) пошук окремих мін та ВНП (відстані для пошуку складають від декількох сантиметрів до декількох метрів);

2) розвідка територій, забруднених ВНП та мінних полів (відстані для пошуку складають від десятків метрів до декількох кілометрів).

В даний час найбільшого застосування знайшли такі методи пошуку мін та ВНП: електромагнітні (індукційний, радіохвильовий, магнітометричний, нелінійний), ядерно-фізичні, теплофізичний та механічний (механічного зондування). Саме вони дозволяють створити технічні засоби пошуку ВНП, які можуть бути придатними для гуманітарного розмінування.

У табл. 1 наведені найбільш важливі демаскуючі ознаки вибухонебезпечних предметів, що реалізуються при їх пошуку. Їх основними фізичними характеристиками є: щільність, твердість, електрична провідність, діелектрична і магнітна проникності, коефіцієнти відображення і випромінювання у видимому (0,4...0,76 мкм) і інфрачервоному (0,76...1000 мкм) діапазонах електромагнітних хвиль.

Сучасні методи та детектори виявлення вибухонебезпечних предметів наведені у табл. 2 [8, 9]. Проблеми, які виникають при застосуванні цих методів – це питання безпеки та зниження часових та матеріальних витрат на розмінування. Інші вимоги: кліматичні, ефективність роботи в темний час доби та у несприятливих погодних умовах, стійкість до механічних впливів, електромагнітна сумісність тощо.

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

Табл. 1. Демаскуючі ознаки вибухонебезпечних предметів

Вид контрасту між об'єктом і оточуючим середовищем	Тип об'єкта пошуку			
	Протипіхотні міни (ППМ)	Протитанкові міни (ПТМ)	ВНП з електронними компонентами	ВНП з кабельними лініями управління
Відмінність електропровідності	+ (може бути дуже малою)	+	+	+
Відмінність магнітної проникливості	±	±	+	+
Відмінність діелектричної проникності	+	+	+	+
Відмінність теплофізичних характеристик	±	±	±	±
Відмінність оптичних характеристик	±	±	±	±
Відмінність механічних характеристик	+	+	+	+
Наявність парів вибухової речовини (ВР)	±	±	±	±
Наявність нелінійних електромагнітних властивостей	±	±	+	±

Примітка: + – контраст є; ± – контраст майже відсутній або є не завжди.

Табл. 2. Сучасні методи та детектори виявлення ВНП

Метод	Детектори та обладнання для виявлення ВНП
Електромагнітний	Металошукач (MD)
	Радіолокатор (GPR)
	Електричний імпедансний томограф (EIT)
	Радіометр на міліметрових хвилях (MMWR)
	Мікрохвильовий радіометр (MWR)
	Інфрачервоний спектроскоп (IR)
Оптичний метод	Лідар – детектор отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем (LIDAR)
Ядерно-фізичний	Детектори нейтронного випромінювання
	Ядерний квадрупольний резонанс (NQR)
Акустичний	Детектори акустичних та сейсмічних хвиль (A/S)
	Детектори звукових та ультразвукових хвиль
Механічний	Інженерні машини для виявлення та підриву мін і вибухових пристроїв
	Щупи
Газоаналітичний	Газоаналізатори та детектори парів вибухових речовин
Теплофізичний	Тепловізори
Біологічний	Сенсорна система тварин (собаки, щури тощо).

Табл. 3 характеризує глибини розміщення у ґрунті ВНП та безконтактні методи пошуку та ідентифікації ВНП, які можуть бути застосовані.

Виходячи із вищезазначеного, сформульовано наступні рекомендації щодо використання сучасних робото-технічних комплексів у гуманітарному розмінуванні:

1) Оскільки процеси, які реалізуються в ході гуманітарного розмінування об'єктів та місцевості, уявляють собою багатоетапну операцію (рис. 3), при цьому будь-який з етапів повинен бути максимально безпечним для персоналу та оточуючого середовища, слід реалізувати комплексний підхід щодо використання РКСП для вирішення широкого переліку завдань, які передбачають використання

різних за призначенням та принципами функціонування РКСП та можуть включати наступні варіанти:

– РКСП для проведення НТО та ТО територій, забруднених ВНП – робототехнічні комплекси наземного, надводного або повітряного тощо базування для отримання розвідувальних даних з використанням фотометричних, відеометричних, магнітометричних, термометричних, лідарних та інших методів і засобів обстеження без фізичного втручання в структуру об'єкту (території), що обстежується;

– РКСП для проведення пошуку, ідентифікації, знешкодження та знищення ВНП, а також оцінювання якості розмінування – робото-технічні комплекси наземного, надводного, підводного або повітряного тощо базування для виконання комплексу робіт щодо пошуку і розпізнання ВНП з використання доступних або знову створених електронних баз даних та програмного забезпечення до них; знешкодження шляхом дистанційного відділення основного заряду ВНП та засобів його ініціювання або переведення ВНП в безпечний стан (у разі можливості); часткового або повного знищення ВНП шляхом доставки та дистанційного підриву зарядів вибухових речовин або засобів випалювання цих речовин тощо;

– РКСП для фіксації місця знаходження потенційної небезпеки, наприклад, міни або ВНП, картографування та маркування територій, забруднених ВНП – робото-технічні засоби або навісне обладнання до них, спроможні здійснювати автоматичний або керований процес позиціонування знайдених, знешкоджених або знищених ВНП, обстежених або очищених територій шляхом використання доступних або знову створених геоінформаційних технологій та засобів їх реалізації.

Табл. 3. Глибини розміщення у ґрунті ВНП та методи пошуку ВНП, які можуть бути застосовані

Глибина пошуку	Методи пошуку ВНП	Тип ВНП
Поверхня ґрунту	Електромагнітний, оптичний, газоаналітичний, механічний, теплофізичний, біологічний	Всі типи ВНП
До 0,1 м	Радіохвильовий	Всі типи ВНП
	Індукційний	Металеві ВНП
До 1 м	Короткоімпульсна радіолокація	Всі типи ВНП
	Магнітометричний	Феромагнітні ВНП

2) Враховуючи специфіку та конструктивні особливості окремих типів ВНП, їх призначення, порядок використання та просторове розташування після їх бойового застосування, що може характеризуватися наявністю різних демаскуючих ознак, наведених в табл. 1, слід мати в наявності та обґрунтовано обирати для подальшого застосування засоби пошуку, знешкодження та знищення ВНП, побудовані на різних фізичних принципах, які наведені в табл. 2 та 3. Як вже відмічалося, найбільшого застосування знайшли такі методи пошуку ВНП: електромагнітні (індукційний, радіохвильовий, магнітометричний, нелінійний), ядернофізичні, теплофізичний та механічний (механічного зондування).

3) Для своєчасного та безперервного виконання робіт з гуманітарного розмінування, необхідно забезпечити наявність резервного запасу технічного оснащення, який повинен складати близько 10 % від необхідної його кількості для виконання робіт по очищенню (розмінуванню) територій.

4) Для ефективного та безпечного виконання робіт з гуманітарного розмінування на всіх етапах їх проведення, а також оптимізації організаційних рішень при управлінні відповідними процесами, персонал, який залучається повинен ма-

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

ти відповідну фахову підготовку, яка здійснюється акредитованими навчальними закладами вищої та професійно-технічної освіти.

8. Обговорення результатів дослідження щодо використання робототехнічних комплексів для розмінування

У ході роботи показано, що система гуманітарного розмінування має виконувати такі завдання:

– обстеження територій, забруднених ВНП;

– пошук, ідентифікацію та знешкодження ВНП;

– картографування та маркування територій, забруднених ВНП;

– здійснення оцінювання якості гуманітарного розмінування.

Пошук та ідентифікація ВНП в ході гуманітарного розмінування є комплексним завданням. У зв'язку з цим, для проведення гуманітарного розмінування РКСП повинні бути оснащені відповідними маніпуляторами та детекторами (сенсорами, датчиками), засобами прийняття рішень та застосовуватись на етапах розвідки, пошуку, локації, маркування, ідентифікації, знешкодження та знищення ВНП, та відповідати встановленим вимогам. Отже, для підвищення ефективності виявлення мін та ВНП доцільно комплексування різних пошукових методів в одному РКСП.

Математична модель щодо очищення (розмінування) територій бойових дій від ВНП та забезпечення безпеки життєдіяльності населення на них, отримана в результаті проведених досліджень, дозволяє оцінити загальний термін $T_{ЗАГ}$ вирішення цієї проблеми. На величину цього терміну впливають різноманітні об'єктивні і суб'єктивні фактори:

– термін нетехнічного та технічного обстеження визначеної імовірно небезпечної території $t_{обст}$, який значною мірою залежить від підготовленості особового складу підрозділів, залучених до обстеження та оснащеності цих підрозділів спеціальною технікою та спорядженням, умов виконання завдань тощо. Оснащення цих підрозділів сучасними зразками РКСП різного призначення, особливо безпілотних літальних апаратів (БПЛА) повітряного базування, значною мірою скоротить час на проведення етапу практичного дослідження, а за результатами проведених розрахунків та експертної оцінки час на виконання цього етапу може скоротитися в 3–5 разів;

– термін очищення (розмінування) підтверджено небезпечної території $t_{очищ}$ також значною мірою від тих самих показників, а застосування для робіт гуманітарного розмінування територій сучасних роботизованих засобів механічного очищення (розмінування) може скоротити загальний час у 5–10 разів. Однак, при застосуванні РКСП різного призначення на всіх етапах проведення робіт з гуманітарного розмінування зростає час на підготовку, технічне обслуговування та поточний і капітальний ремонт, а також логістичне забезпечення цих технічних засобів.

Проведені розрахунки дозволили в певній мірі оцінити загальну кількість особового складу та технічного оснащення для виконання необхідних робіт з очищення (розмінування) територій, забруднених ВНП. На оціночні показники також впливають певні аспекти:

– якість та швидкість виконання завдань залежить не тільки від кількості особового складу та технічних засобів, а й від підготовленості (навченості) та досвіду персоналу, досконалості та ефективності використання ним наявних зразків технічного оснащення. Як доводять розрахунки та експертна оцінка, на сучасно-

му етапі наявну на початок повномасштабного вторгнення в Україну роійскої армії чисельність особового складу піротехнічних підрозділів ДСНС слід збільшити до 3-х разів, з понад 500 до понад ніж 1700 осіб. Таке збільшення тягне за собою витрати часу на підготовку, перепідготовку та підвищення кваліфікації персоналу для знову створених піротехнічних підрозділів. Важливим є не допустити зменшення якості підготовки особового складу в обґрунтовано зменшені строки їх навчання;

– збільшення в такому ж обсязі технічного оснащення для знову створених піротехнічних підрозділів призводить до необхідності збільшення часу на опанування зразками сучасної закордонної техніки та обладнання.

– слід також враховувати, що при виконання робіт з підвищеною небезпекою, до яких відносяться роботи з гуманітарного розмінування, необхідно забезпечити наявність резервного запасу технічного оснащення, який повинен складати близько 10 % від необхідної його кількості для виконання робіт по очищенню (розмінуванню) території.

Результати досліджень можуть бути застосовані при створенні робототехнічних комплексів та систем військового, спеціального та подвійного призначення, які застосовуються у сфері гуманітарного розмінування. Також встановлено, що для підвищення ефективності виявлення ВНП доцільний комплексний підхід щодо застосування різних пошукових методів в одному РКСП з відкритою архітектурою, яка дозволяє максимально оперативно підлаштовуватися під широкий комплекс завдань, що виконуються. Розрахунки, які проведені з використанням запропонованої математичної моделі, та експертна оцінка проведення робіт з гуманітарного розмінування в сучасних умовах та їх перспектив у післявоєнний період підтверджує доцільність та ефективність такого підходу, при цьому може бути забезпечене прискорення темпів проведення робіт у 2–3 рази.

Один з нових перспективних методів виявлення мін – це параметричний. Він заснований на реєстрації взаємодії збудливого (силового) та зондуючого (інформаційного) фізичних полів, на об'єктах пошуку штучного походження (мінах). Поєднання цих полів може бути різним.

Проте, в реальному застосуванні, найбільш перспективним є застосування комбінації електромагнітного, оптичного та механічного методів.

Обмеженням досліджень є те, що сучасні методи та детектори виявлення ВНП не достатньо повно пройшли експериментальну перевірку в умовах реальних обставин, які можуть бути на територіях, забруднених ВНП.

Можливим розвитком цього дослідження може бути розробка РКСП, які можуть здійснювати пошук (не тільки на поверхні ґрунту, але і на певній глибині або висоті), ідентифікацію та прийняття рішення щодо знешкодження мін та ВНП.

9. Висновки

1. Досліджено робото-технічні комплекси військового, спеціального або подвійного призначення, які застосовуються у системі гуманітарного розмінування. Визначено, що система гуманітарного розмінування передбачає виконання наступних завдань: обстеження територій, забруднених вибухонебезпечними предметами; пошук, ідентифікація та знешкодження вибухонебезпечних предметів; картографування та маркування територій, забруднених вибухонебезпечними предметами; здійснення оцінювання якості гуманітарного розмінування. Найбільш комплексним і водночас кропітким та науково ємким завданням є пошук та ідентифікація вибухонебезпечних предметів. У зв’язку з цим, для проведення гуманітарного розмінування

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

робото-технічні комплекси спеціального призначення повинні бути оснащені відповідними маніпуляторами та детекторами (сенсорами, датчиками), засобами прийняття рішень та застосовуватись на етапах розвідки, пошуку, локації, ідентифікації, а також маркування, знешкодження та знищення вибухонебезпечних предметів, та відповідати встановленим вимогам.

2. Запропоновані керуючий алгоритм та математична модель щодо очищення (розмінування) територій бойових дій від вибухонебезпечних предметів та забезпечення безпеки життєдіяльності населення на них, дозволяють оцінити терміни вирішення цієї проблеми, загальну кількість особового складу та необхідну загальну кількість технічного оснащення для виконання робіт при вирішенні даної проблеми. Дослідження довели, що наявна чисельність особового складу, а отже і технічного оснащення, повинні бути збільшеними в понад ніж 3 рази. Застосування сучасних зразків технічного оснащення піротехнічних підрозділів ДСНС дозволить прискорити темпи проведення нетехнічного та технічного обстеження в 3–5 разів, а очищення (розмінування) підтверджено небезпечних територій – в 5–10 разів, однак слід враховувати терміни та якість підготовки персоналу, час на логістичне забезпечення технічного оснащення.

3. Надано рекомендації щодо використання сучасних робото-технічних комплексів у гуманітарному розмінуванні та встановлено, що для підвищення ефективності виявлення мін та вибухонебезпечних предметів доцільний комплексний підхід щодо застосування різних пошукових методів в одному робото-технічному комлексі з відкритою архітектурою, яка дозволяє максимально оперативно підлаштовуватися під широкий комплекс завдань, що виконуються. Розрахунки та експертна оцінка підтверджує доцільність та ефективність такого підходу, при цьому може бути забезпечене прискорення темпів проведення робіт у 2–3 рази. Одним з найбільш перспективних методів виявлення мін та вибухонебезпечних предметів є параметричний який, заснований на реєстрації взаємодії збудливого (силового) та зондуючого (інформаційного) фізичних полів, на об'єктах пошуку штучного походження (мінах). Проте, в реальному застосуванні, найбільш перспективним є застосування комбінації електромагнітного, оптичного та механічного методів.

Література

1. Tarhan M. Invisible Death: Antipersonnel mines continue to claim thousands of lives. Anadolu agency. 2021. URL: https://bit.ly/352MG61

2. Manjula Udayanga Hemapala. Robots for Humanitarian Demining. Submitted: 25th October, 2016; Reviewed: 29th June, 2017; Published: 20th December, 2017. doi: 10.5772/intechopen.70246

3. Florez J., Parra C. Review of sensors used in robotics for humanitarian demining application. Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA); 29–30 September, 2016. Bogota: IEEE, 2016. P. 1–6.

4. Koppetch K. Mechanical Demining Equipment Catalogue [Internet]. Geneva: GICHD. 2019. URL: http://www.eudem.vub.ac.be/publications/publication.asp?pub_id=14

5. Trevelyan J., Hamel W.R., Kang S.C. Robotics in hazardous applications. Springer Handbook of Robotics. Springer International Publishing. London: 2016. P. 1521–1548.

6. Cepolinaa E., Bruschini C., De Bruyn K. Providing demining technology end-users need. In: Proceeding of the IARP International workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining (HUDEM2005). Tokyo Denki Universi-

ty, 21–23 June, 2005. Tokyo, Japan: 2005. P. 9–14. URL: https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/HUDEM2005.pdf

7. Струтинський В. Б., Юрчишин О. Я., Кравець О. М. Розвиток основних положень проектування маніпуляторів мобільних роботів спеціального призначення адаптованих для роботи з небезпечними об'єктами. Матеріали XXII міжнародної НТК «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2021. С. 129–131. URL: http://conf.mmi.kpi.ua/proc/article/view/239152

8. Furuta K., Ishikawa J. Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining. London: Springer, 2009. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1483&context=cisr-journal

9. Kasban H., Zahran O., Sayed M. Elaraby, M. El-Kordy, F. E. Abd El-Samie. A Comparative Study of Landmine Detection Techniques. An International Journal Sensing and Imaging. 2010. Vol. 11. P. 89–112. URL: https://www.researchgate.net/publication/225752842_A_Comparative_Study_of_Landmine_Detection_Techniques

10. Янушкевич Д. А., Іванов Л. С. Роботизовані засоби спеціального призначення: аналіз міжнародних нормативних документів. Виробництво & Мехатронні Системи 2021. Матеріали V Міжнародної конференції. Харків, ХНУРЕ. 2021. С. 176–179. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/2021/M&MS-2021/zbirnik-_mms_2021.pdf

11. Янушкевич Д. А., Іванов Л. С. Сучасні тенденції застосування роботизованих систем для гуманітарного розмінування. Збірник матеріалів III форуму «Автоматизація, електроніка та робототехніка. Стратегії розвитку та інноваційні технології» AERT-2021. URL: https://mts.nure.ua/conferences-ua/forum/aert-2021

12. Freese M., Matsuzawa T., Oishi Y., Debenest P., Takita K., Fukushima E.F., Hirose S. Robotics-assisted demining with gryphon. Advanced Robotics. 01 January, 2007. Tokyo, Japan. 2007. 21(15). P. 1763–1786. URL: https://ru.booksc.eu/book/36010951/4c0f48

13. TALON Small Mobile Robot URL: https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/talon.htm

14. Foster-Miller unveils TALON robot that detects chemicals, gases, radiation and heat. URL: https://bit.ly/3FrZ1Rm

15. Dragon Runner 6×6. URL: https://bit.ly/3xsWxQ2

16. Warrior 710. URL: http://www.army-guide.com/rus/ product4994.html

17. Наземні бойові роботи: лідери та Україна. URL: https://lb.ua/news/2021/11/17/498795_nazemni_boyovi_roboti_lideri.html

I. Nevlyudov*[1]*, *DSc, Professor, Head of the Department*
D. Yanushkevich*[1]*, *PhD, Senior Research Fellow, Associate Professor of the Department*
I. Tolkunov*[2]*, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
I. Popov*[2]*, *PhD, Associate Professor, Teacher of the Department*
H. Ivanets*[2]*, *PhD, Associate Professor*
[1] *Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine*
[2] *National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine*

JUSTIFICATION OF THE NEED TO CREATE MODERN ROBOTIC AND TECHNICAL COMPLEXES FOR HUMANITARIAN DEMINING

A study of military, special or dual purpose robotic complexes used in the humanitarian demining system was conducted. It was determined that the system of humanitarian demining involves the following tasks: inspection of objects and terrain contaminated by explosive objects; their search, remote identification, neutralization and destruction; mapping and marking of dangerous areas, etc. In this re-

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

gard, it has been proven that for humanitarian demining, it will be appropriate to use robotic and technical complexes of special purpose, which should be equipped with manipulators and detectors (sensors, gauges), means of decision-making at all stages of the work. A mathematical model and a control algorithm have been developed for the clearance of explosive objects from the territory of hostilities using robotic complexes that implement the principle of an integrated approach to solving the problem of clearing the territories of Ukraine. The proposed mathematical model is a combination of interconnected models: estimation of the terms of solving the problem of clearing the territory of combat operations from explosive objects, the total number of personnel and technical equipment of the units to perform the assigned tasks. According to the results of the research, recommendations were given for the use of modern robotic complexes in humanitarian demining and it was established that to increase the efficiency of detecting explosive objects, it is advisable to use various search methods in one robotic complex. One of the most promising methods is the use of a combination of electromagnetic, optical and mechanical methods, as well as the development of complexes capable of searching for, neutralizing and destroying explosive objects not only on the surface of the soil, but also at a certain depth.

Keywords: humanitarian demining, robotic complex, non-technical and technical inspection of territories

References

1. Tarhan, M. (2021). Invisible Death: Antipersonnel mines continue to claim thousands of lives. Anadolu agency. Available at: https://bit.ly/352MG61

2. Manjula Udayanga Hemapala. (2017). Robots for Humanitarian Demining. Submitted: 25th October, 2016; Reviewed: 29th June, 2017; Published: 20th December, 2017. doi: 10.5772/intechopen.70246

3. Florez, J., Parra, C. (2016). Review of sensors used in robotics for humanitarian demining application. Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA); 29-30 September, 2016. Bogota: IEEE. 1–6.

4. Koppetch, K. (2019). Mechanical Demining Equipment Catalogue [Internet]. Geneva: GICHD. Available at: http://www.eudem.vub.ac.be/publications/publication.asp?pub_id=14

5. Trevelyan, J., Hamel, W. R., Kang, S. C. (2016). Robotics in hazardous applications. Springer Handbook of Robotics. Springer International Publishing. London, 1521–1548.

6. Cepolinaa, E., Bruschini, C., De Bruyn, K. (2005). Providing demining technology end-users need. In: Proceeding of the IARP International workshop on Robotics and Mechanical Assistance in Humanitarian Demining (HUDEM2005). Tokyo Denki University, 21–23 June, 2005. Tokyo, Japan, 9–14. Available at: https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/HUDEM2005.pdf

7. Strutynsky, V. B., Yurchyshyn, O. Ya., Kravets, O. M. (2021). Development of the basic principles of designing manipulators of mobile robots of special purpose adapted for work with dangerous objects. Materials of the XXII International STC «Progressive Engineering, Technology and Engineering Education». Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 129–131. Available at: http://conf.mmi.kpi.ua/proc/article/view/239152

8. Furuta, K., Ishikawa, J. (2009). Anti-personnel Landmine Detection for Humanitarian Demining. London: Springer. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1483&context=cisr-journal

9. Kasban, H., Zahran, O., Sayed, M. Elaraby, M. El-Kordy, F. E. Abd El-Samie. (2010). A Comparative Study of Landmine Detection Techniques. An International Journal Sensing and Imaging, 11, 89–112. Available at: https://www.researchgate.net/publication/225752842_A_Comparative_Study_of_Landmine_Detection_Techniques

10. Yanushkevich, D. A., Ivanov, L. S. (2021). Robotic special purpose vehicles:

analysis of international regulations. Manufacturing & Mechatronic Systems 2021. Proceedings of the V International Conference. Kharkov, KhNURE, 176–179. Available at: https://nure.ua/wp-content/uploads/2021/M&MS-2021/zbirnik-_m-ms_2021.pdf

11. Yanushkevich, D. A., Ivanov, L. S. (2021). Current trends in the use of robotic systems for humanitarian demining. Proceedings of the III Forum «Automation, Electronics and Robotics. Development Strategies and Innovative Technologies» AERT-2021. Available at: https://mts.nure.ua/conferences-ua/forum/aert-2021

12. Freese, M., Matsuzawa, T., Oishi, Y., Debenest, P., Takita, K., Fukushima, E. F., Hirose, S. (2007). Robotics-assisted demining with gryphon. Advanced Robotics. 01 January, 2007. Tokyo, Japan, 21(15), 1763–1786. Available at: https://ru.booksc.eu/book/36010951/4c0f48

13. TALON Small Mobile Robot Available at: https://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/talon.htm

14. Foster-Miller unveils TALON robot that detects chemicals, gases, radiation and heat. Available at: https://bit.ly/3FrZ1Rm

15. Dragon Runner 6×6. Available at: https://bit.ly/3xsWxQ2

16. Warrior 710. Available at: http://www.army-guide.com/rus/ product4994.html

17. Ground combat robotics: leaders and Ukraine. Available at: https://lb.ua/news/2021/11/17/498795_nazemni_boyovi_roboti_lideri.html

Надійшла до редколегії: 19.09.2023
Прийнята до друку: 08.11.2023

© І. Ш. Невлюдов, Д. А. Янушкевич, І. О. Толкунов, І. І. Попов та ін.

УДК 623.454.38

М. В. Кустов, *д.т.н., доцент, нач. наук. відділу (ORCID 0000-0002-6960-6399)*
О. В. Кулаков, *к.т.н., доцент, с.н.с. наук. 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. наук. 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

МОДЕЛЬ ДИФРАКЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ НА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТАХ

Запропоновано модель дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечному предметі без металевих конструкційних елементів. Проаналізовані властивості речовин найбільш розповсюджених протипіхотних мін та встановлено, що їх оболонка є діелектричною, а безпосередньо вибухові речовини поділяються на дві групи в залежності від їх дипольного моменту. Зокрема вибухові речовини гексоген, пентаеритриттетранітрат та фульмінатом ртуті є речовинами з нульовим дипольним моментом й за електромагнітними властивостями відносяться до ідеальних діелектриків. Вибухові речовини тринітротолуол, тетрил, тринітрорезорцинату свинцю та азид свинцю слід розглядати як діелектрики з малими втратами. Побудовано електродинамічну модель для розрахунку коефіцієнту відбивання та коефіцієнту проходження електромагнітних плоских хвиль надвисокочастотного діапазону крізь багатошарову структуру вибухонебезпечного предмету. Для визначення еквівалентного хвильового опору багатошарової структури вибухонебезпечного предмету запропоновано використання теорії довгих ліній. Встановлено, що для випромінювання надвисокочастотного діапазону шарами корпусу вибухонебезпечних предметів із діелектричних речовин можна нехтувати внаслідок їх малої товщини. За результатами проведених розрахунків встановлено ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини та показано, що більшість протипіхотних мін має низький коефіцієнт відбивання, що ускладнює їх виявлення. Однак, при цьому збільшується кількість енергії, що проходить у глибину вибухової речовини. Показано, що вибухонебезпечні предмети із дипольними вибуховими речовинами здатні до поглинання енергії електромагнітного випромінювання. Отримані результати дозволяють якісно оцінити схильність вибухових речовин до їх дистанційного знешкодження внаслідок опромінення електромагнітним випромінюванням надвисокочастотного діапазону.

Ключові слова: рівень цивільного захисту територій, вибухонебезпечні речовини, електромагнітні хвилі, відбивання, поглинання, дифракція

1. Вступ

Нові виклики для України, що пов'язані із активними військовими діями на її території в тому числі, обумовлені забрудненням значної території держави вибухонебезпечними предметами (ВНП). Ситуація суттєво ускладнюється тим, що розміщення мін на території мінування не відомо внаслідок того, що активним мінуванням займались не лише Збройні Сили України (ЗСУ), але й військові підрозділи ворога. Особливу небезпеку представляє те, що при цьому використовувались ВНП з різними конструкційними особливостями, включаючи саморобні. Це призводе до неможливості повернення евакуйованого населення до своїх домівок на визволених територіях, неможливості відновлення роботи промислового та сільськогосподарського комплексів. Тому на сьогодні першочерговою задачею оперативно-рятувальних сил цивільного захисту ДСНС є якнайшвидше очищення місцевості від ВНП. Для розв'язання цієї задачі піротехнічні підрозділи ДСНС використовують різні методи виявлення та деактивації ВНП. Однак, незважаючи на активну та професійну роботу піротехнічних підрозділів та наявність у них новітніх зразків техніки та приладів для розмінування, спостерігаються випадки неконтрольованого підриву ВНП. Внаслідок цього є випадки за-

гибелі та травмування працівників ДСНС та пересічних громадян. Це, перш за все, пов'язано з тим, що широкого розповсюдження набули ВНП із мінімальним вмістом металевих компонентів або взагалі без них. Тому існуючи методи виявлення та деактивації ВНП показали свою недостатню ефективність.

Таким чином, існуюча проблема полягає у складності виявлення піротехнічними підрозділами ВНП без металевих конструкційних елементів.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Процес розмінування територій в небойових умовах складається з двох етапів – виявлення ВНП та його деактивація. Кожен з цих етапів передбачає низку різноманітних способів та методик реалізації. Що стосується технічних засобів виявлення ВНП, слід зазначити, що інженерні війська ЗСУ і піротехнічні підрозділи ДСНС оснащені магнітними шукачами МБИ-1, МБИ-2, ИНМ (ПР-506); бомбошукачами ИМБ; міношукачами переносними ИМП, ИМП-2 (ПР507), МИВ (для водолазів-розвідників), РВМ «ВЕРЕСК», РВМ-2, РВМ-2М (ПР-504А), ММП «ЦИКЛОП» для пошуку протитанкових і протипіхотних мін [1]. В інших державах світу магнітний метод також набув широкого розповсюдження за рахунок своєї простоти реалізації [2]. Однак, магнітний метод пошуку ВНП має суттєві обмеження по конструкційним особливостям самих ВНП та їх місць розміщення. Тому паралельно розвиваються й інші методи виявлення ВНП. Всі методи виявлення вибухонебезпечних речовин та ВНП можна поділити на чотири групи: фізичні, фізико-хімічні, хімічні, органолептичні.

До фізичної групи належать такі як дрейф-спектрометричний метод. Він полягає в тому, що іонізовані молекули вибухових речовин попадають в дрейф-камеру, під дією електричного поля переміщуються до колектора. Потрапляючи до нього, вони створюють імпульс струму в електричному колі, що підсилюється й обробляється електронним блоком. Час дрейфу до колектора залежить від рухливості іонів і параметрів електричного поля, що і покладено в основу ідентифікації аналізованої речовини [3]. Однак цей метод не є ефективним для ВНП із герметичною оболонкою.

Ядерні методи виявлення вибухових речовин використовують ядерні реакції для виявлення вибухових речовин, прихованих, наприклад, у багажі чи вантажі. Досліджені ядерні методи виявлення вибухових речовин, у яких нейтрони або в деяких випадках рентгенівські промені високої енергії (МеВ) використовуються для опромінення [4]. Такі методи включають аналіз на теплових нейтронах, спектроскопію, інтроскопію пропускання імпульсних швидких нейтронів, асоційоване зображення частинок і ядерну резонансну флуоресценцію [5]. Основним недоліком таких методів є необхідність використання коштовного та великого за масогабаритними параметрами обладнання, що суттєво знижує область їх застосування.

Індукційний метод полягає на індукційному балансі – кілька котушок індуктивності, одна передавальна і одна або дві прийомні, що утворюють індуктивний датчик. Всі котушки розміщені в просторі таким чином, щоб сигнал з передавальної котушки при відсутності поблизу металевих предметів не наводився на приймальні, тобто вся система була б збалансована і сигнал на виході був би рівний нулю.

До фізико-хімічних методів відносять газо-хроматографічний метод, який ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за рахунок розподілу її компонентів на межі фаз високочистих газів-носіїв та чутливому сорбенті. Рідинно-хроматографічний метод ґрунтується на виявленні часток вибухової речовини за

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

рахунок його властивостей розчинятися в рідинах-носіях та утримуватися певний час на сорбенті [6]. Як і у випадку спектрометричного методу він є неефективним для ВНП у герметичній оболонці, коли вилучається можливість потрапляння часток самої вибухової речовини у навколишнє середовище. Потенціометричний метод ґрунтується на зміні електричного опору речовини під дією електричного струму [7], поляриметричний метод – під дією світового потоку кожна речовина має свій спектр [8]. Обидва методи передбачають безпосередній контакт детектора із поверхнею пошуку, що є небезпечним для випадків практичного застосування піротехнічними підрозділами.

До хімічних методів належить метод крапельної реакції (крапельні тести), який ґрунтується на зміні кольору слідів вибухової речовини під дією певного хімічного реагенту. Метод тонкошарової хроматографії ґрунтується на властивостях вибухової речовини в певних умовах (насичена пароповітряна суміш розчинників) розкладатися на чисті речовини. Ця група методів розрахована на знаходження вибухових речовин на різних поверхнях, шкірі, одязі [9].

До органолептичних методів відносять візуальний метод, який ґрунтується на вивченні розпізнавальних зовнішніх прикмет вибухових речовин та пристроїв. Біофізичний метод, який у свою чергу, поділяється на такі:

- біосенсорний метод – метод, що ґрунтується на виявленні азотовмістовних речовин за допомогою собак, свиней тощо;
- біолюмінесцентний метод – метод, що ґрунтується на виявленні за допомогою УФ-люмінесценції залишок вибухової речовини на руках, одязі тощо.

Ферментативний метод ґрунтується на виявленні мікрочасток вибухової речовини на руках, багажу тощо при нанесенні її на спеціальний оброблений тампон. Як видно кожен метод має свої недоліки та не може забезпечити повну безпеку особі, що проводить розмінування.

Тому на сьогодні широкого розвитку набувають методи дистанційного пошуку та деактивації ВНП. Основним принципом роботи роботизованих комплексів пошуку ВНП є забезпечення транспортування приладів пошуку по замінованій місцевості без присутності людини [10]. Однак при цьому залишається невирішеним питання вилучення та деактивації ВНП. Активно розробляються та використовуються роботизовано комплекси розмінування, принципом дії яких є підрив ВНП за рахунок механічного контакту [11]. Цей метод виключає необхідність пошуку ВНП, однак при цьому має низьку недоліків: швидкість розмінування та необхідність обов’язкового контакту роботизованого комплексу з ВНП. Цього недоліку можна позбавитись шляхом використання методу дистанційної деактивації ВНП опроміненням електромагнітними хвилями, який запропоновано в роботі [12]. Використання такого методу дозволить дистанційно підривати або деактивувати ВНП, які не містять металевих конструкційних елементів, та які знаходяться в полі опромінення без необхідності визначення їх місця розташування. Однак, питання проникнення та розповсюдження електромагнітних хвиль у тілі ВНП залишається нез’ясованим.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність електродинамічної моделі розповсюдження електромагнітних хвиль на елементах вибухонебезпечних предметів.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є побудова електродинамічної моделі дифракції електромаг-

нітних хвиль при проходженні крізь неметалевий вибухонебезпечний предмет у вигляді вибухової речовини в оболонці.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

1. Побудувати електродинамічну модель дифракції електромагнітних хвиль при проходження крізь багатошарову структуру вибухонебезпечного предмету.

2. Встановити ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є ВНП з неметалевими конструкційними елементами (або з незначною їх кількістю). До таких ВНП можна віднести протипіхотні фугасні міни, наприклад, ПМН-2, ПФМ-1 та міни осколкової дії, наприклад, МОН-90 та ПОМ-3.

Предметом дослідження є дифракція електромагнітних хвиль на ВНП з неметалевими конструкційними елементами з метою визначення кількості енергії електромагнітного поля, що може бути поглинена вибуховою речовиною всередині ВНП.

Враховуючі відомі закономірності розповсюдження електромагнітних хвиль в нерструмопровідному середовищі висувається гіпотеза про можливість поглинання вибухонебезпечною речовиною ВНП енергії електромагнітних хвиль надвисокочастотного діапазону у кількості, достатній для її детонування.

Для побудови електродинамічної моделі дифракції електромагнітних хвиль при проходження крізь багатошарову структуру ВНП застосовувався метод аналітичного розв'язання рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами та теорію довгих ліній.

Розрахунки проводитимуться засобами обчислювальної техніки з використанням програми Maple.

5. Побудова моделі дифракції електромагнітних хвиль на багатошаровій структурі вибухонебезпечного предмету

Будь-яка електродинамічна задача полягає в розв'язанні рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами.

Розглянемо розповсюдження електромагнітної хвилі з вектором Пойнтинга П крізь ВНП, який має оболонку різної товщини d_1 та d_3, яка вироблена із різних речовин з хвильовими опорами Z_{c2} та Z_{c4} відповідно (рис. 1).

Між оболонками знаходиться вибухова речовина товщиною d_2 з хвильовим опором Z_{c3}, який і є основним об'єктом дослідження. Граничними шарами з хвильовими опорами Z_{c1} та Z_{c5} є повітря в якому знаходиться ВНП. Ці граничні шари можна прийняти напівнескінченими. Виходячи з того, що оболонка ВНП виконана із однієї речовини із сталою товщиною та цей предмет знаходиться у повітрі із рівномірними параметрами, то:

$$d_1 = d_2, Z_{c2} = Z_{c4}, Z_{c1} = Z_{c5}. \quad (1)$$

Вектор густини потоку енергії електромагнітної хвилі (вектор Пойнтинга) у комплексному вигляді $\dot{\Pi}$ розраховується через вектора (комплексні числа) напруженості електричного $\dot{E}$ та магнітного $\dot{H}$ полів за формулою [13]:

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

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

де

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \dot{E}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{E}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \\ \dot{H} &= \dot{H}^+ \cdot e^{-i\dot{\gamma}z} + \dot{H}^- \cdot e^{i\dot{\gamma}z}, \end{aligned} \tag{3}$$

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

$$\dot{\gamma} = \omega \cdot \sqrt{\dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu \cdot \mu_0} = k - i \cdot \alpha, \tag{4}$$

де ω – кутова частота електромагнітної хвилі; $\dot{\varepsilon}$ – комплексна діелектрична проникність речовини; ε_0 –діелектрична проникність вакууму; μ – магнітна проникність середовища; μ_0 – магнітна проникність вакууму; k – фазова постійна розповсюдження (хвильове число), що характеризує зміну фази хвилі на одиницю відстані; α – коефіцієнт затухання хвилі. k та α визначаються як:

$$\begin{aligned} k &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + tg^2\delta_\varepsilon} + 1)}, \\ \alpha &= \frac{\omega}{2c} \cdot \sqrt{\varepsilon \cdot \mu \cdot (\sqrt{1 + tg^2\delta_\varepsilon} - 1)}, \end{aligned} \tag{5}$$

де $tg\delta_\varepsilon$ – тангенс кута діелектричних втрат (вважаємо тангенс кута магнітних втрат $tg\delta_\mu = 0$).

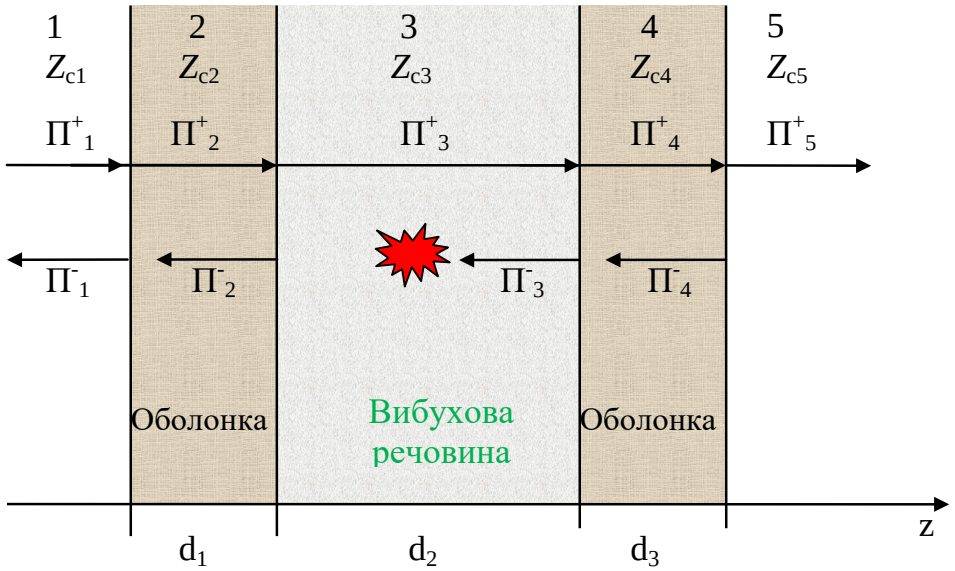


Рис. 1. Модель розповсюдження електромагнітних хвиль крізь вибухонебезпечний предмет (ВНП)

Дійсна частина $\mathrm{Re}(\dot{\Pi})$ дорівнює середньому потоку активної потужності, уявна частина $\mathrm{Im}(\dot{\Pi})$ дорівнює амплітуді реактивної потужності.

Хвильовий опір $\dot{Z}_C$ можна представити у комплексному вигляді як:

$$\dot{Z}_C = \frac{\dot{E}^+}{\dot{H}^+} = \frac{\dot{E}^-}{\dot{H}^-} = \frac{\dot{\gamma}}{\omega \cdot \dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0} = \sqrt{\frac{\mu \cdot \mu_0}{\dot{\varepsilon} \cdot \varepsilon_0}}. \quad (6)$$

Для переходу від комплексних значень до миттєвих діючих значень рівняння (3) з урахуванням (4) помножимо на $e^{i\omega t}$, візьмемо діюче значення й отримуємо для електричного поля:

$$E = \mathrm{Re}(\dot{E} \cdot e^{i\omega t}) =$$
$$= E_m^+ \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos(\omega t - kz + \varphi_0^+) + E_m^- \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos(\omega t + kz + \varphi_0^-). \quad (7)$$

де φ_0^+ та φ_0^- – початкові фази, що залежать від початку координат чи часу спостереження.

Проаналізуємо параметри хвилі для трьох середовищ, представлених на рис. 1, а саме повітря (ділянки 1, 5), пластикова оболонка (ділянки 2, 4), вибухова речовина (ділянка 3).

1. Повітря. Для шару повітря до 100 м (саме такі умови передбачає застосування методу дистанційного знешкодження ВНП) в якості електромагнітних властивостей можна взяти властивості вакууму із достатньою точністю припущення (ε=1, μ=1; tgδ=0). Відповідно з (5) маємо, що при таких умовах затухання електромагнітної хвилі відсутнє (α=0), при цьому хвиля розповсюджується зі швидкістю світла $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$ та має довжину хвилі $\lambda_0 = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f}$ (де f – циклічна частота електромагнітної хвилі). Хвильовий опір для таких умов повітря також можна прийняти як $Z_{c1} = Z_{c5} = Z_{c0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi$ Ом, при цьому вектори електрич-ного та магнітного полів змінюються синфазне.

2. Оболонка. Як розглядалось вище оболонка протипіхотних мін виконана із діелектричного пластика для зменшення чутливості при виявленні індукційними приладами розмінування. Тобто такі речовини за своїми властивостями максимально наближені до ідеальних діелектриків, для яких виконуються умови: ε>1, μ=1; tgδ_ε=tgδ_μ=0. Відповідно, відмінністю від повітря, яке розглянуто вище, є те, що в оболонці швидкість розповсюдження хвилі (відповідно, c_2 та c_4), довжина хвилі (відповідно, λ_2 та λ_4) та хвильовий опір (відповідно, Z_{c2} та Z_{c4}) зменшуються в $\sqrt{\varepsilon}$ разів:

$$c_2 = c_4 = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},\ \lambda_2 = \lambda_4 = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}},\ Z_{c2} = Z_{c4} = \frac{Z_{c0}}{\sqrt{\varepsilon}}. \quad (8)$$

3. Вибухова речовина. Як розглядалось в роботі [12] всі вибухові речовини відносяться до діелектриків двох різних класів. Такі речовини як гексоген

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

($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$), та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) мають нульовий дипольний момент та нечутливі до електромагнітного випромінювання, тобто їх можна віднести до ідеальних діелектриків, властивості яких розглянуті вище. Однак такі вибухові речовини, як 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 потрібно розглядати як діелектрики з малими втратами ($\varepsilon>1$, $\mu=1$, $0<tg\delta_\varepsilon<<1$, $tg\delta_\mu=0$). Для таких умов відповідно до (5) для k можна нехтувати $tg^2\delta_\varepsilon$, тобто швидкість та довжина хвилі залишаються таким ж як і в ідеальному діелектрику. Однак, для таких речовин вже є суттєвим хвильове затухання ($\alpha \neq 0$). Якщо використати наближення:

$$\sqrt{1+tg^2\delta_\varepsilon} \approx 1+tg^2\frac{\delta_\varepsilon}{2},$$

то отримуємо:

$$\alpha = \frac{\omega}{2c}\cdot\sqrt{\varepsilon\cdot\mu\cdot(\sqrt{1+tg^2\delta_\varepsilon}-1)} \approx \frac{\omega}{2c}\cdot\sqrt{\varepsilon}\cdot tg\delta_\varepsilon = \frac{\omega}{2c_3}\cdot tg\delta_\varepsilon = \frac{\pi}{\lambda_3}\cdot tg\delta_\varepsilon = \sigma\cdot Z_{c3}, \quad (9)$$

де σ – питома електрична провідність середовища.

З (9) видно, що коефіцієнт затухання прямо пропорційний питомої електричної провідності вибухової речовини.

6. Встановлення ступеня ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні вибухонебезпечного предмету

З електродинамічної точки зору ступень ослаблення енергії електромагнітних хвиль при проходженні через неметалевий предмет можна оцінити за допомогою показників «коефіцієнт проходження електромагнітної хвилі» та «коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі» [13].

Якщо розглядати процес проходження електромагнітної хвилі крізь декілька шарів, як показано на рис. 1, то видно, що крізь шари 1–4 розповсюджується і пряма хвиля й відбита, тоді як в шарі 5 – лише пряма. Тому з (3) з урахуванням (6) можна отримати наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}
&\dot{E}_{1-4} = \dot{E}^+_{1-4}\cdot e^{-i\dot{\gamma}z_{1\text{-}4}} + \dot{E}^-_{1-4}\cdot e^{i\dot{\gamma}z_{1\text{-}4}},\\
&\dot{H}_{1-4} = (\dot{E}^+_{1-4}\cdot e^{-i\dot{\gamma}z_{1\text{-}4}} + \dot{E}^-_{1-4}\cdot e^{i\dot{\gamma}z_{1\text{-}4}})/\dot{Z}_{c1\text{-}4},\\
&\dot{E}_5 = \dot{E}^+_5\cdot e^{-i\dot{\gamma}z_5},\\
&\dot{H}_5 = \dot{E}^+_5\cdot e^{-i\dot{\gamma}z_5}/\dot{Z}_{c5}.
\end{aligned} \quad (10)$$

Використовуючи модель, в якій різні середовища з хвилевими опорами $\dot{Z}_{cn}$ моделюються відрізками довгих ліній з опорами $\dot{Z}_{0n}$ (дорівнює відношенню комплексних амплітуд напруги та струму для хвиль однакового напрямку), правило трансформації опорів довгих ліній [14], рівняння (6), (10) та приймаючи, що $d = z_n - z_{n-1}\,(n=1,2,3,4,5)$, $d_1 = d_3$ отримуємо вирази для еквівалентного опору багатошарової структури, приведеної на рис. 1:

$$\dot{Z}'_{05} = \dot{Z}_{04}\frac{Z_{05}+i\cdot\dot{Z}_{04}\cdot tg(\dot{\gamma}_4\cdot d_1)}{\dot{Z}_{04}+i\cdot Z_{05}\cdot tg(\dot{\gamma}_4\cdot d_1)}$$
$$\dot{Z}''_{05} = \dot{Z}_{03}\frac{\dot{Z}_{04}+i\cdot\dot{Z}_{03}\cdot tg(\dot{\gamma}_3\cdot d_2)}{\dot{Z}_{03}+i\cdot\dot{Z}_{04}\cdot tg(\dot{\gamma}_3\cdot d_2)}, \quad (11)$$
$$\dot{Z}'''_{05} = \dot{Z}_{02}\frac{\dot{Z}_{03}+i\cdot\dot{Z}_{02}\cdot tg(\dot{\gamma}_2\cdot d_1)}{\dot{Z}_{02}+i\cdot\dot{Z}_{03}\cdot tg(\dot{\gamma}_2\cdot d_1)}.$$

Виходячи з цього коефіцієнт відбивання електромагнітної хвилі від багатошарової структури (рис. 1) розраховується за виразом:

$$\dot{\rho} = \frac{\dot{Z}'''_{05} - Z_{01}}{\dot{Z}'''_{05} + Z_{01}}. \quad (12)$$

Коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль крізь багатошарову структуру (рис. 1) розраховується за формулою:

$$\dot{\tau} = \frac{2\cdot\dot{Z}'''_{05}}{\dot{Z}'''_{05} + Z_{01}}. \quad (13)$$

Для забезпечення виділення достатньої кількості енергії необхідно застосовувати електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль, порівнюваних з розміром ВНП. При цих умовах довжина хвилі λ>1 см (НВЧ діапазон). Вважаючи, що товщина стінок оболонки є незначною ($d_1=d_3$~0,1 см) у порівнянні з довжиною вибухової речовини, еквівалентним опором на ділянках 2 та 4 нехтуємо. Відповідно, рівняння (11) перетворяться у рівняння

$$\dot{Z}'_{05} = \dot{Z}_{03}\frac{Z_{05}+i\cdot\dot{Z}_{03}\cdot tg(\dot{\gamma}_3\cdot d_2)}{\dot{Z}_{03}+i\cdot Z_{05}\cdot tg(\dot{\gamma}_3\cdot d_2)}. \quad (14)$$

На рис. 2 та 3 представлено графічний вигляд залежності модулю коефіцієнту відбивання $|\rho|$ та фази φ_ρ відповідно до рівняння $\dot{\rho} = |\rho|\cdot e^{i\cdot\varphi_\rho}$ для електромагнітної хвилі частотою f=1 ГГц від діелектричної проникності ε в діапазоні від 1 до 20 вибухової речовини товщиною d від 3 см до 10 см при μ=1, $tg\delta_\varepsilon$=0, $tg\delta_\mu$=0.

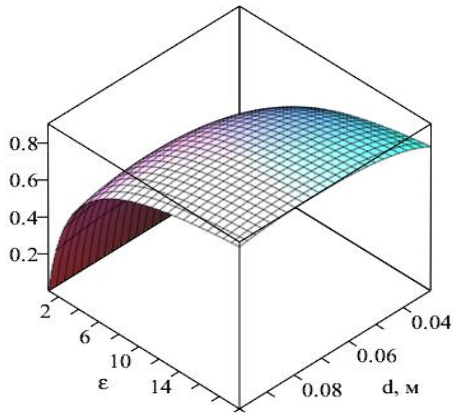


Рис. 2. Залежність модулю коефіцієнта відбивання $|\rho|$ від діелектричної проникності ε та товщини вибухової речовини d

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

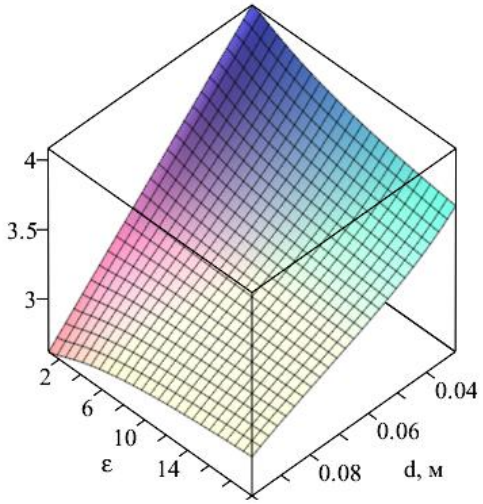


Рис. 3. Залежність фази φ_ρ коефіцієнта відбивання від діелектричної проникності ε та товщини d вибухової речовини

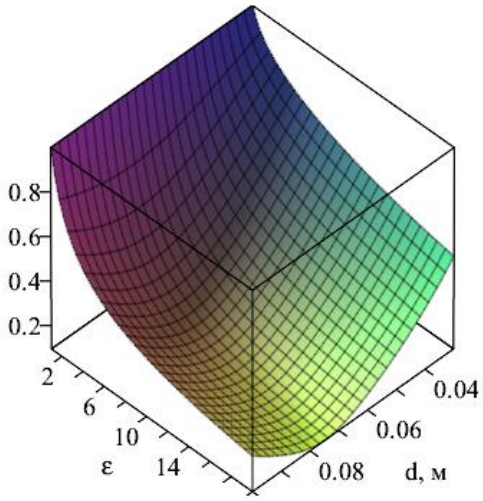


Рис. 4. Залежність модулю $|\tau|$ коефіцієнта проходження від діелектричної проникності ε та товщини d вибухової речовини

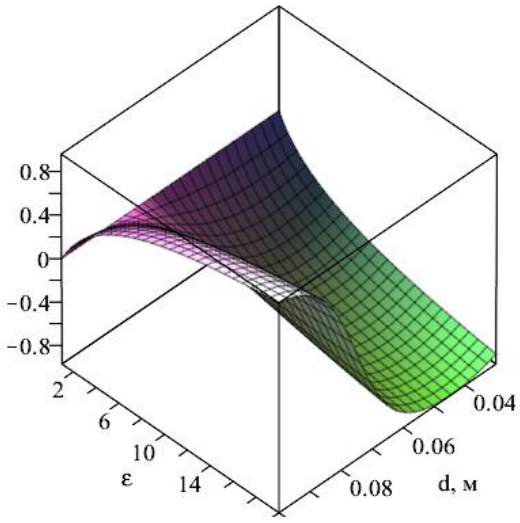


Рис. 5. Залежність фази φ_τ коефіцієнта проходження від діелектричної проникності ε та товщини d вибухової речовини

На рис. 4 та рис. 5 представлено графічні залежності модулю $|\tau|$ та фази φ_τ коефіцієнту проходження відповідно до рівняння $\dot{\tau} = |\tau| \cdot e^{i \cdot \varphi_\tau}$ при тих же параметрах електромагнітної хвилі.

7. Обговорення результатів моделювання дифракції електромагнітних хвиль на вибухонебезпечному предметі

Аналіз залежності модулю $|\rho|$ коефіцієнту відбивання $\dot{\rho}$ електромагнітного випромінювання від ВНП без металевих конструкційних елементів від діелектричної проникності ε вибухової речовини та товщини d вибухової речовини (рис. 2) показує, що $|\rho|$ збільшується з ростом ε за законом, близьким до логарифмічного, та наближається до 1 приблизно при ε>20. Враховуючі, що модуль коефіцієнту відбивання характеризує зміну амплітуди хвилі при відбиванні, можна зробити висновок, що при діелектричній проникності більше 10 більша частина енергії електромагнітної хвилі відбивається від ВНП, що може бути використано, наприклад, для встановлення місця знаходження цього ВНП на поверхні землі. Збільшення товщини d вибухової речовини приводить до зменшення $|\rho|$ (більший за розміром ВНП відбиває меншу частину електромагнітної енергії).

Збільшення діелектричної проникності ε вибухової речовини призводить до збільшення фази φ_ρ коефіцієнта відбивання (рис. 3). Подібною є залежність φ_ρ й від товщини вибухової речовини d. З фізичної точки зору фаза коефіцієнту відбивання показує величину запізнення відбитої хвилі відносно падаючої.

Модуль $|\tau|$ коефіцієнту проходження $\dot{\tau}$ електромагнітного випромінювання через ВНП без металевих конструкційних елементів зменшується за законом, близьким до гіперболічного (рис. 4). З цього можна зробити припущення, що при збільшення величини діелектричної проникності вибухонебезпечної речовини збільшується кількість енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини. З рис. 4 видно, що при ε>10 $|\tau|$ має виражений мінімум при зміні товщині вибухонебезпечної речовини. $|\tau|$ є мінімальним при ε=20 та товщині вибухонебезпечної речовини біля 0,07 м, що також свідчить про збільшення енергії електромагнітної хвилі, що розсіюється всередині цієї речовини.

З рис. 5 видно, що фаза φ_τ коефіцієнта проходження суттєво залежить від діелектричної проникності ε та товщини d вибухової речовини. На відміну від фази φ_ρ фаза φ_τ змінює свій знак, що може свідчити про зміну поляризації електромагнітної хвилі. З фізичної точки зору фаза коефіцієнту проходження показує величину запізнення хвилі, що пройшла ВНП, відносно падаючої.

Розраховані коефіцієнти відбиття та проходження електромагнітного випромінювання крізь ВНП без наявності металевих конструкційних елементів (рис. 2–5) показали, що такі предмети мають низький коефіцієнт відбиття та високий коефіцієнт проходження. Це пов'язано з тим, що ВНП виконані із діелектричних матеріалів. Це є негативним фактором для їх виявлення, так як низький рівень відбитого випромінювання важко ідентифікувати та відокремити від «шуму» на фоні відбиття від інших предметів ландшафту. Однак це є позитивним фактором для дистанційного підриву таких ВНП за рахунок опромінення електромагнітним полем. Висока діелектрична проникність оболонки таких ВНП не перешкоджає проникненню енергії випромінювання до

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

вибухової речовини. При цьому також треба звернути увагу на електромагнітні властивості вибухових речовин. Для таких речовин, як гексоген ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітрат ($C_5H_8(ONO_2)_4$), та фульмінат ртуті ($Hg(ONC)_2$) з нульовим дипольним моментом та діелектричною проникністю $\varepsilon \approx 1$ коефіцієнт проходження суттєво більший. Це призводить до того, що кількість енергії, що поглинається ВНП буде мінімальною. Відповідно використання методу дистанційного підриву за рахунок електромагнітного випромінювання для таких ВНП недоцільний. Однак такі вибухові матеріали, як 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, це призводить до суттєвого зниження коефіцієнту проходження (рис. 4). При цьому значення модулю τ корелює із дипольним моментом цих речовин та їх діелектричною приникненністю. Відповідно ВНП з такими речовинами у якості вибухових схильні до поглинання енергії електромагнітного випромінювання та їх підрив може бути ініційований НВЧ випромінюванням дистанційно. Однак слід звернути увагу, що для таких речовин на 30–40 % збільшується й коефіцієнт відбиття ρ у порівнянні з неполярними речовинами. Хоча це й полегшує виявлення таких ВНП за рахунок моніторингу відбитого випромінювання, однак це й зменшує кількість енергії яка поглинається масою вибухової речовини. Однак представлені на рис. 2–5 результати дозволяють лише якісно оцінити кількість поглиненої тілом ВНП енергії випромінювання. Тому у подальшому доцільно використати отримане в цій роботі теоретичне підґрунтя для розробки моделі поглинання НВЧ випромінювання вибуховими речовинами.

8. Висновки

1. Побудована електродинамічна модель дифракції електромагнітних хвиль при проходження крізь багатошарову структуру вибухонебезпечного предмету шляхом розв'язання рівнянь Максвела з відповідними граничними умовами. Запропоновано розглядати процес опромінення електромагнітним випромінюванням вибухонебезпечних предметів, що знаходяться на поверхні землі, як поетапний процес проходження, поглинання та відбивання від поверхонь розділу шарів оболонки та вибухової речовини. Це дозволяє застосовувати однакові електродинамічні моделі для всіх шарів з відповідними параметрами хвильового опору Z_c, товщини d, діелектричної проникності ε, магнітної проникності середовища μ та тангенсу кута діелектричних втрат $\mathrm{tg}\,\delta$. Проаналізовані ці параметри для речовин, з яких вироблені протипіхотні фугасні міни ПМН-2, ПФМ-1 та протипіхотні міни осколкової дії МОН-90 та ПОМ-3. Встановлено, що речовини, з яких вироблено їх корпуси, мають $\varepsilon>1$, $\mu=1$; $\mathrm{tg}\delta=0$, а вибухові речовини поділяються на два класи: $\varepsilon>1$, $\mu=1$; $\mathrm{tg}\delta=0$ та $\varepsilon>1$, $\mu=1$; $\mathrm{tg}\delta<<1$, відповідно.

2. Встановлено ступінь ослаблення енергії електромагнітних хвиль у товщі вибухової речовини за допомогою визначення коефіцієнтів відбивання та проходження електромагнітного випромінювання НВЧ діапазону крізь вибухонебезпечний предмет. Отримано рівняння для визначення еквівалентного хвильового опору вибухонебезпечного предмету. Аналіз результатів розрахунку коефіцієнтів відбивання та проходження показав, що модуль та фазове число коефіцієнту проходження суттєво залежать від дипольного моменту вибухової речовини та можуть змінюватись в 5–8 разів в залежності від хімічного складу вибухової речовини. Коефіцієнт відбивання для вибухонебезпечних предметів з такими дипо-

льними вибуховими речовинами як тринітротолуол ($C_7H_5N_3O_6$), тетрил ($C_7H_5N_5O_8$), тринітрорезорцинату свинцю ($C_6H(NO_2)_3(OPb)_2$) та азид свинцю ($Pb(N_3)_2$) також на 30–40 % більший у порівняння з гексогеном ($C_3H_6N_6O_6$), пентаеритриттетранітратом ($C_5H_8(ONO_2)_4$) та фульмінатом ртуті ($Hg(ONC)_2$). Отримані результати дозволяють оцінити кількість поглиненої енергії та, відповідно, оцінити можливість дистанційного впливу електромагнітним випромінюванням на вибухонебезпечні предмети.

Література

1. Іщенко А. В., Кобець М. В. Засоби і методи виявлення вибухових речовин та пристроїв у боротьбі з тероризмом. Національна академія внутрішніх справ України. 2005, 146 с. URL: http://elar.naiau.kiev.ua/bitstream/123456789/18996/1/Kobets%20M.V.%20Zasoby%20i%20metody%20vyaiyvlenaiy%20VP.pdf

2. 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). P. 3175. doi: 10.3390/s21093175

3. Фірман В. М., Сеник В. В., Білінський Б. О. Виявлення вибухових пристроїв шляхом детектування парів і часток вибухових речовин та особиста безпека персоналу. Пожежна безпека. 2019. Том 8. С. 30–32. URL: https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/issue/archive

4. Kagan A., Jimmie C. O. Counterterrorist Detection Techniques of Explosives, Second Edition. 2022. P. 429. URL: https://www.elsevier.com/book-and-jurnals

5. Clifford E., Ing H., McFee J., Cousins T. High rate counting electronics for a thermal neutron analysis land mine detector. Proc. SPIE 3769. Penetrating Radiation Systems and Applications. (1 October 1999). doi: 10.1117/12.363677.

6. Gaft M., Nagli L. UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. Optical materials. 2008. Vol. 30(11). P. 1739–1746. doi: 10.1016/j.optmat.2007.11.013

7. Sun W., Liu S., Wang M., Zhang X., Shang K., Liu Q. Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. Science of The Total Environment. 2023. Vol. 860. P. 160511. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160511

8. Horvath T. Emergency Cases at Countering Improvised Explosive Devices (C-IED), and their Potential Management. Land Forces Academy Review. 2019. Vol. 24(2). P. 95–106. URL: https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2_2019/Horvath_ RAFT_2_2019.pdf

9. Kabessa Y., Eyal O., Bar-On O., Korouma V., Yagur-Kroll S., Belkin S., Agranat A. J. Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. Biosensors and Bioelectronics. 2016. Vol. 79. P. 784–788. doi: 10.1016/j.bios.2016.01.011

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

11. Wynn C. M., Palmacci S., Kunz R. R., Rothschild M. A novel method for remotely detecting trace explosives. Lincoln Laboratory Journal. 2008. Vol. 17(2). P. 27–39. URL: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/novel-method-remotely-detecting-trace-wynn-ja-14525.pdf

12. Kustov M., Karpov A. Sensitivity of explosive materials to the action of electromagnetic fields. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 4–17.

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

doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-1

13. Kolcunová I., Pavlík M., Beňa L., Čonka Z., Ilenin S., Kanálik M., Zbojovský J. Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material. Acta Physica Polonica A. 2017. Vol. 131(4). P. 1135–1137. doi: 10.12693/APhysPolA.131.1135

14. Rahmani-Andebili M. Problems: Transmission Line Model and Performance. In: Power System Analysis. Springer, Cham. 2022. P. 53–57. doi: 10.1007/978-3-030-84767-8_5

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

MODEL OF DIFFRACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON EXPLOSIVE OBJECTS

A model of electromagnetic wave diffraction on an explosive object without metal structural substances is proposed. The properties of the materials of the most common anti-personnel mines were analyzed and it was established that their shell is dielectric, and explosive substances are divided into two groups depending on their dipole moment. In particular, the explosive substances such as hexogen, pentaerythritol tetranitrate, and mercury fulminate with zero dipole moment and according to their electromagnetic properties, they belong to ideal dielectrics. The explosives trinitrotoluene, tetryl, lead trinitroresorcinate, and lead azide should be considered as low-loss dielectrics. An electrodynamic model was built to calculate the reflection coefficients and the passage of electromagnetic plane waves of the microwave range through the multilayer structure of an explosive object. To determine the equivalent wave resistance of the multilayer structure of an explosive object, the use of the theory of long lines is proposed. It is established that for microwave radiation, the layers of the case of explosive objects made of dielectric substances can be neglected due to their small thickness. The modeling results show that most anti-personnel mines have a low reflection coefficient, which makes them difficult to detect, but at the same time increases the amount of energy that can pass deep into the body of the explosive substance. It has been shown that explosive objects with dipole explosive substances are capable of absorbing electromagnetic radiation energy. The obtained results allow us to qualitatively assess the susceptibility of explosive substances to their remote detonation by irradiation with powerful pulses of electromagnetic radiation in the microwave range.

Keywords: level of civil protection of territories, explosive substances, electromagnetic waves, reflection, absorption, diffraction

References

1. Ishchenko, A. V., Kobets, M. V. (2005). «Zasoby i metody vyiavlennia vybukhovykh rechovyn ta prystroiv u borotbi z teroryzmom. Natsionalna akademiia vnutrishnikh sprav Ukrainy». Means and methods of detecting explosive substances and devices in the fight against terrorism. National Academy of Internal Affairs of Ukraine, 148. Available at: http://elar.naiau.kiev.ua/bitstream/123456789/18996/1/Kobets%20M.V.% 20Zasoby%20i%20metody%20vyaiyvlenaiy%20VP.pdf

2. 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

3. Firman, V. M., Senyk, V. V., Bilinskyi, B. O. (2019). «Vyiavlennia vybukhovykh prystroiv shliakhom detektuvannia pariv i chastok vybukhovykh

rechovyn ta osobysta bezpeka personalu. Pozhezhna bezpeka», Detection of explosive devices by detecting vapors and particles of explosives and personal safety of personnel. Fire safety, 8, 2019, 30–32. Available at: https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/issue/archive

4. Kagan, A., Oxley, J. (2022). Counterterrorist Detection Techniques of Explosives, Second Edition, 429. Available at: https://www.elsevier.com/book-and-jurnals

5. Clifford, E., Ing, H., McFee, J., Cousins, T. (1999). High rate counting electronics for a thermal neutron analysis land mine detector", Proc. SPIE, Penetrating Radiation Systems and Applications, 3769. doi: 10.1117/12.363677

6. Gaft, M., Nagli, L. (2008). UV gated Raman spectroscopy for standoff detection of explosives. Optical materials, 30(11), 1739–1746. doi: 10.1016/j.optmat.2007.11.013

7. Sun, W., Liu, S., Wang, M., Zhang, X., Shang, K., Liu, Q. (2023). Soil copper concentration map in mining area generated from AHSI remote sensing imagery. Science of The Total Environment, 860, 160511. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.160511

8. Horvath, T. (2019). Emergency Cases at Countering Improvised Explosive Devices (C-IED), and their Potential Management. Land Forces Academy Review, 24(2), 95–106. Available at: https://www.armyacademy.ro/reviste/rev2_2019/Horvath_ RAFT_2_2019.pdf

9. Kabessa, Y., Eyal, O., Bar-On, O., Korouma, V., Yagur-Kroll, S., Belkin, S., Agranat, A. J. (2016). Standoff detection of explosives and buried landmines using fluorescent bacterial sensor cells. Biosensors and Bioelectronics, 79, 784–788. doi: 10.1016/j.bios.2016.01.011

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

11. Wynn, C. M., Palmacci, S., Kunz, R. R., Rothschild, M. (2008). A novel method for remotely detecting trace explosives. Lincoln Laboratory Journal, 17(2), 27–39. Available at: https://www.ll.mit.edu/sites/default/files/publication/doc/novel-method-remotely-detecting-trace-wynn-ja-14525.pdf

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

13. Kolcunová, I., Pavlík, M., Beňa, L., Čonka, Z., Ilenin, S., Kanálik, M., Zbojovský, J. (2017). Influence of electromagnetic shield on the high frequency electromagnetic field penetration through the building material. Acta Physica Polonica A, 131(4), 1135–1137. doi: 10.12693/APhysPolA.131.1135

14. Rahmani-Andebili, M. (2022). Problems: Transmission Line Model and Performance. In: Power System Analysis. Springer, Cham., 53–57. doi.org/10.1007/978-3-030-84767-8_5

Надійшла до редколегії: 19.09.2023
Прийнята до друку: 10.11.2023

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)*
Є. О. Рибка, *д.т.н., професор, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0002-5396-5151)*
С. В. Гарбуз, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-6345-6214)*
К. М. Остапов, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-1275-741X)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ЕВАКУАЦІЇ ЛЮДЕЙ З БУДІВЕЛЬ ПРИ ПОЖЕЖІ

Об’єктом дослідження є безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти. Вирішувалась проблема, що полягала у невідповідності кількісної оцінки «часу до початку евакуації» викладеної у ДСТУ 8828:2019, що регулюється вимогами ДБН В.2.5-56:2014, умовам сьогодення, при визначенні безпечного часу евакуації з будівель та споруд. Завдяки отриманим результатам виявлено особливості, що повноцінно визначають залежність взаємозв’язку між часом початку евакуації та системами оповіщення на прикладі типового закладу середньої освіти. Визначено час евакуації згідно з ДСТУ 8828:2019 із урахуванням вимог ДБН В.2.5-56:2014. Загальний час евакуації із будівлі склав 687 с. Визначено час блокування шляхів евакуації та евакуаційних виходів небезпечними чинниками пожежі. Результати зафіксованої температури не перевищили 46 ^{o}C, значення густини кисню не зафіксовано нижче, ніж ≥ 0,226 кг/м^3, густина чадного газу не більше ≤1,16·10^{-3} кг/м^3 протягом загального часу евакуації, що задовольняє вимогам пожежної безпеки. Результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення. Таким чином шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с, отже на момент проходження останньої особи через сходову клітину та двері № 7 видимість складає вже ≤6 м. Отже евакуація через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання особа проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с, де значення видимості становить ≤9 м, що теж є перевищенням гранично допустимих значень, відповідно до вимог. Завдяки проведеному дослідженню виявлено, що є доцільним внесення змін щодо забезпечення закладів середньої освіти системам оповіщення іншого типу, або нормування «часу початку евакуації» у методиці.

Ключові слова: евакуація, системи оповіщення, небезпечні чинники пожежі, заклади освіти, PathFinder, PyroSim

1. Вступ

Належний рівень пожежної безпеки об’єктів досягається шляхом виконання вимог комплексу протипожежного захисту. Одним зі способів протипожежного захисту є забезпечення своєчасної евакуації людей з будівель чи споруд до моменту блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Чи забезпечена безпечна евакуація у разі виникнення пожежі може бути перевірено шляхом проведення натурних експериментів або за допомогою комп’ютерного моделювання. Розрахунок часу, необхідного для безпечної евакуації згідно ДСТУ 8828:2019 складається з «часу до початку евакуації», який зумовлено певними чинниками, такими як тип об’єкту, стан людей, наявність систем оповіщення і т.д., та «часом слідування» до безпечної зони, який залежить від категорії мобільності осіб, що евакуюються.

Щодо кількісної оцінки «часу до початку евакуації», що викладена у ДСТУ 8828:2019, слід зауважити, що ключовим чинником початку евакуації є спрацювання системи оповіщення, типи та час спрацювання яких регламентуються ДБН В.2.5-56:2014 та не змінювались з 2014 року. З урахуванням тенденції швидкого розвитку містобудування, а саме будівель складної форми та конфігурації, вказані вимоги потрібно регулярно переглядати.

Аналіз [1] стандартів, таких як PD 7974-6:2004, CFPA-E Guideline № 19:2009 F свідчать, що кількісна оцінка «часу до початку евакуації» має суттєві відмінності від значень, зазначених у методиці ДСТУ 8828:2019. Зокрема у керівництві з пожежної інженерії (США) [2] та методиці розрахунку евакуації [3] застосовують підхід, який охоплює врахування таких параметрів:
час до початку руху, який складається з часу виявлення, часу оповіщення, часу розпізнавання сигналу оповіщення, та часу відгуку на сигнал оповіщення; розрахунок часу до початку руху враховує такі складові, як тип будівлі, рівні менеджменту, час спрацювання системи оповіщення, та стан людей, що евакуюються з різноманітним варіюванням.

Таким чином, розбіжності у підходах до визначення безпечного часу евакуації людей при пожежі з будівель та споруд з масовим перебуванням людей є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У [4] за допомогою програмного забезпечення на основі BIM і Pathfinder, досліджено евакуацію на прикладі об'єкту охорони здоров'я. Авторами розглянуто два сценарії руху: рух лише сходами; евакуація із використанням пожежних ліфтів. У результаті досліджень виявлено, що без застосування пожежних ліфтів загальний час евакуації становить 1112 с. У разі проведення евакуації із використання пожежних ліфтів загальний час евакуації зменшується до 863 с. Як підсумок автори стверджують, що кількість ліфтів має бути відповідним чином збільшена, відносно до існуючих інженерних рішень. Але авторами не досліджено зв'язок між системами оповіщення та кількісною оцінкою часу до початку евакуації, який полягає в основі розрахунку загального безпечного часу евакуації.

У [5] проведено дослідження щодо моделювання безпечної евакуації з торгового комплексу. Встановлено безпечний інтервал часу, за яким відбувається безпечна евакуація, який складає 1012 с. У результаті автори розділяють загальну криву 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: 600–800 с, яку можна описати як період повільного росту, оскільки в цей час швидкість евакуації почала значно зменшуватися. Третя стадія – після 800 с. Швидкість евакуації зростає повільно порівняно з попередньою, і значно знижується у частині евакуаційних сходів. Слід зауважити, що автори не висвітлюють інтервал часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення і початок загального руху людей, і подальший вплив на загальний час евакуації на прикладі цього об'єкту.

Авторами [6] досліджено параметри евакуації з приміщення театру із одночасним моделюванням пожежі. Загальний час евакуації складає 350 с. У результаті моделювання встановлено, що на 180 с вільного розповсюдження пожежі спостерігається зниження видимості близько до критичних значень. Протягом 600 с горіння, настає критична концентрація диму у всьому об'ємі приміщення. Але автори не зазначають, який інтервал спрацювання систем оповіщення, від якого залежить час початку евакуації.

У роботі [7] досліджено рівень пожежної в гуртожитку університету із використанням Pyrosim. Визначено швидкість зміни температури, видимості, висоти диму та теплового потоку. За допомогою Pathfinder досліджено безпечний час евакуації

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

в умовах горіння обраної пожежної навантаги, який складає 164,8 с. Автори дають рекомендації щодо мінімальної ширини вихідних дверей, яка повинна бути не менше 3 м, а ширина сходів – не менше 1,75 м. Зокрема питання взаємозв'язку початку евакуації із системами оповіщення висвітлено не повному обсязі.

Авторами [8] досліджено час безпечної евакуації на прикладі приміщення будівлі університету. Результати моделювання показують що час перевищення гранично допустимих норм небезпечних чинників пожежі для бібліотеки становить 280 с за шкалою пожежі 4 МВт. Результати моделювання евакуації показують, що час евакуації з приміщення бібліотеки складає 411 с. Зокрема встановлено зв'язок між висотою диму та динамікою зростання небезпечних чинників пожежі. Таким чином автори стверджують, що перевищення гранично допустимих норм спостерігається за зниженням диму до 2 м. Час початку евакуації становить 40 с, що є суперечним з довідниковими даними різних стандартів та кількісних оцінок, що пропонуються для моделювання.

У роботі [9] за допомогою програмного забезпечення PyroSim та Pathfnder досліджено процес евакуації з житлової будівлі в умовах пожежі. Встановлено, що при 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 із зміною стратегії руху встановлено, що час необхідний для евакуації становить 355,2 с, що відповідає вимогам належного рівня пожежної безпеки об'єкту. Але не зрозуміло, яка кількісна оцінка часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення використовувались в зазначеному дослідженні на прикладі цього об'єкту.

Авторами [10] за допомогою Pathfinder проведено дослідження щодо евакуації з виробничого цеху, а для моделювання пожежі використано програмне забезпечення PyroSim. У роботі розглядався час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Також була обрана діюча стратегія евакуації, за використанням якої блокування евакуаційних виходів спостерігалося раніше, ніж остання людина залишала виробничий цех. Як висновок автори пропонують посилити навчання з евакуації людей, переглянути та удосконалити стратегії евакуації. Слід зауважити, що на сьогодні для будівель виробничого призначення не відомі кількісні дані часу початку до евакуації, окрім експериментальних результатів, які слід застосовувати під час моделювання.

Авторами [11] як типове громадське місце, при моделюванню евакуації обрано університетську бібліотеку з великим пожежним навантаженням. Використано програми Revit, Pyrosim і Pathfinder. У результаті встановлено, що час безпечної 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 за рахунок збільшення вказівок щодо трансляції, додавання знаків, розширення сходів та інших пропозицій щодо оптимізації. Але не зрозуміло, як і чи взагалі використано кількісну оцінку часу до початку евакуації або час спрацювання системи оповіщення, що впливає на достовірність отриманих результатів.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених визначенню часу евакуації та процесу евакуації людей при пожежі з будівель різного призначення, досі не вирішеним є питання впливу типу системи оповіщення про пожежу, а отже і часу початку евакуації, що встановлені вітчизняними нормативними документами для конкретних типів будівель, на реальний час безпечної евакуації людей при пожежі.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є виявлення особливостей часу евакуації при пожежі на прикладі закладу середньої освіти.

Для досягнення мети були поставленні наступні завдання:

– визначити час евакуації при пожежі з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення;

– визначити час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єкт дослідження – безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти.

Предмет дослідження – вплив типу системи оповіщення про пожежу та часу початку евакуації на безпечний час евакуації людей при пожежі з типового закладу середньої освіти.

Основна гіпотеза полягає в тому, що час евакуації людей при пожежі, розрахований за вимогами вітчизняних нормативних документів, що враховують час до початку евакуації (ДСТУ 8828:2019) та тип і час спрацювання системи оповіщення (ДБН В.2.5-56:2014), не відповідає реальному часу безпечної евакуації людей та може призвести до їх загибелі через блокування евакуаційних шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі.

Дослідження проводили розрахунковим методом із використанням програми Fire Dynamics Simulator (країна походження США), користуючись інтерфейсом PyroSim (країна походження США) та PathFinder (країна походження США).

5. Результати виявлення особливостей часу евакуації при пожежі

5.1. Результати визначення часу евакуації з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення

Як модель об’єкту обрано типовий заклад середньої освіти з наступними об’ємно-планувальними рішеннями: кількість поверхів – 4; поверхи висотою по 3 м; перекриття між поверхами товщиною 20 см; ширина коридорів 1,8 м; ширина та висота дверей у учбових класах та інших приміщеннях 0,8 та 2 м; дві сходових клітини; три евакуаційні виходи розташовані на першому поверсі; доступ до евакуаційних виходів є тільки через сходові клітини; товщина несучих стін – 40 см; товщина внутрішніх стін – 20 см.

Загальний вигляд створеної моделі та розташування сходових клітини у закладі, через які відбувається евакуація у разі виникнення пожежі наведено на рис. 1.

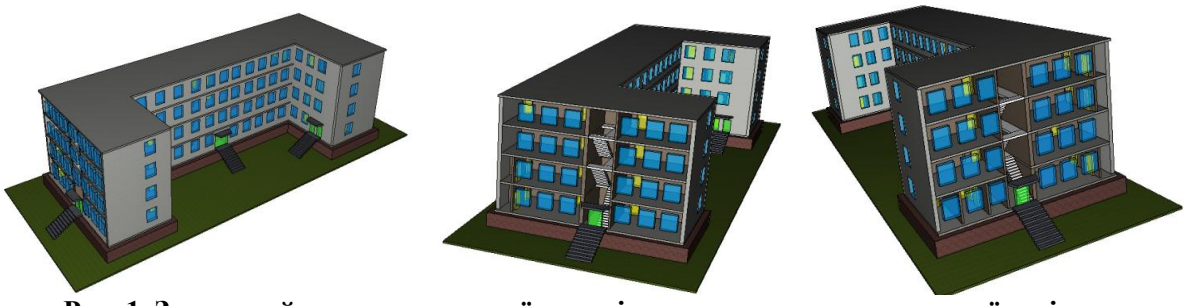


Рис. 1. Загальний вигляд створеної моделі типового закладу середньої освіти

Як вхідні параметри пожежної навантаги та будівельних матеріалів із довідкових джерел (табл. 1, 2) у моделі обрано наступне:

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

Табл. 1. Параметри пожежного навантаження приміщення типового закладу середньої освіти [12]

Характеристика приміщення	Навчальний клас (меблі+папір)
Нижча теплота згорання Q, кДж·кг $^{-1}$	13800
Лінійна швидкість розповсюдження полум'я по поверхні горючого матеріалу ϑ, м·с $^{-1}$	0,0108
Питома масова швидкість вигорання горючого матеріалу Ψ_F, кг·м $^{-2}$ ·с $^{-1}$	0,0145
Виділення CO_2 L_{CO}, кг·кг $^{-1}$	0,203
Виділення CO L_{CO}, кг·кг $^{-1}$	0,0021
Димоутворюваньна здатність D_m, Нп·м $^{-2}$ кг $^{-1}$	270
Споживання кисню LO_2, кг·кг $^{-1}$	1,03

Табл. 2. Теплофізичні параметри матеріалів стін та стелі [12]

Цегляні стіни	
Коефіцієнт теплопровідності, кВ/(м·°С)	0,0015
Питома теплоємність, кДж/(кг·°С)	0,96
Густина, кг/м^3	2645
Ступінь чорноти	0,9
Залізобетонне перекриття	
Коефіцієнт теплопровідності, кВ/(м·°С)	0,00175
Питома теплоємність, кДж/(кг·°С)	1
Густина, кг/м^3	2200
Ступінь чорноти	0,94

Розміщення осіб у навчальних класах та інших приміщеннях у типовому закладі середньої освіти подано на рис. 2.

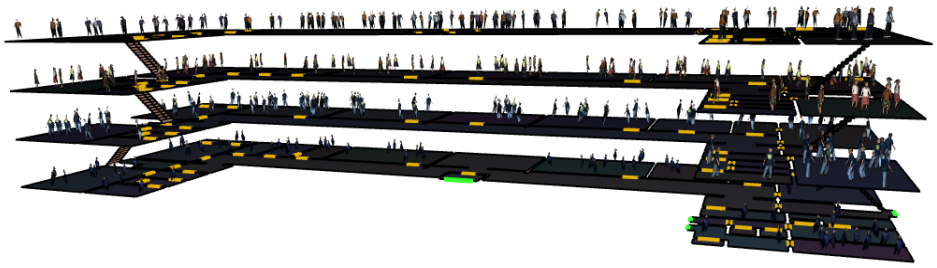


Рис. 2. Розміщення осіб у навчальних класах та інших приміщеннях типового закладу середньої освіти

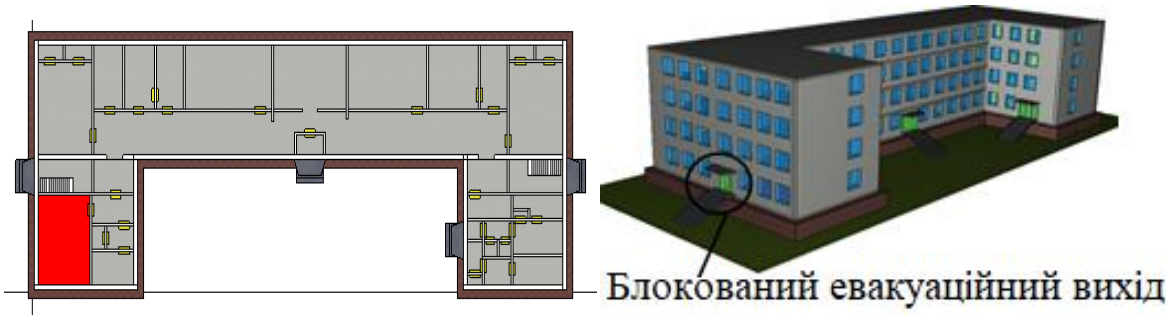
Кількість осіб, що беруть участь у евакуації становить 385 з наступними параметрами горизонтальної проекції: учні молодших класів – 0,04 м^2; учні середніх класів – 0,06 м^2; учні старших класів – 0,08 м^2.

Швидкість руху для горизонтального шляху і сходів униз мінімальні 70 м/хв, а для сходів вгору – 62 м/хв.

Відповідно до додатку Б, ДБН В.2.5-56:2014 зазначений заклад середньої освіти повинен бути забезпечений СО ІІІ типу.

Навчальний клас, який розташовано на першому поверсі поблизу одного з евакуаційних виходів обрано як місце виникнення пожежі (рис 3, а.). При цьому вважається заблокованим один з евакуаційних виходів, який розташовано на першому поверсі. (рис 3, б)

Початок евакуації у закладі середньої освіти при наявності системи оповіщення І—ІІІ типів становить 360 с. Залежність часу евакуації наведені на рис. 4.



а) **б)**

Рис. 3. Параметри евакуації: а – місце виникнення пожежі; б – заблокований евакуаційний вихід

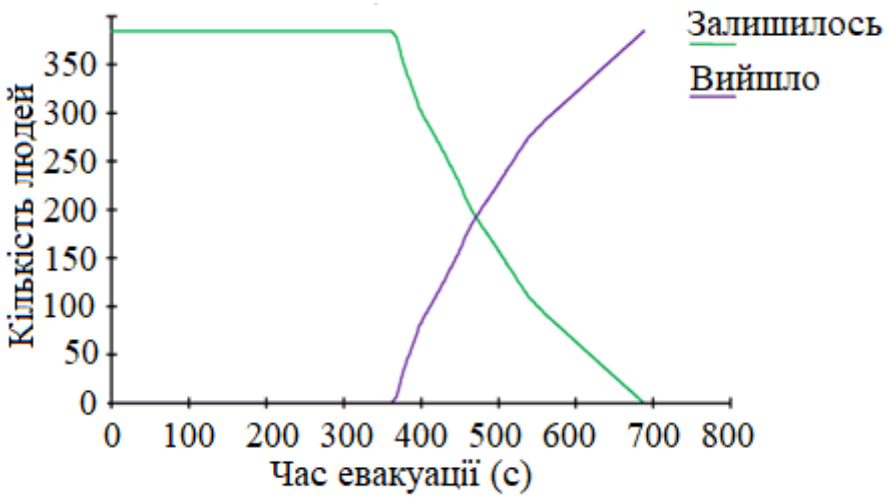


Рис. 4. Загальний час евакуації при наявності СО I—III типів 687 с

Шлях до евакуаційних виходів № 1 та № 2 забезпечений через сходову клітину № 1 та № 2. Під час моделювання рух осіб відбувався усіма доступними шляхами до евакуаційних виходів. Рух через евакуаційний вихід № 2 триває на протязі 687 с. Маршрут руху до евакуаційного виходу № 1 через сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7, що розташовані на першому поверсі. Тривалість руху через двері № 7 триває протягом 531 с, що подано на рис. 5. Після цього евакуація через цю сходову клітину не відбувається.

Тривалість руху через евакуаційний вихід № 1 складає 550 с, що подано на рис. 6.

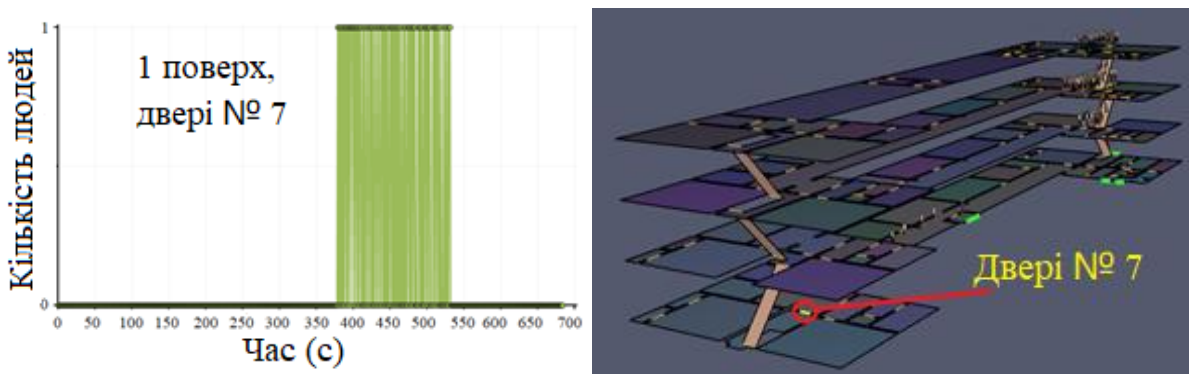


Рис. 5. Час евакуації через двері № 7

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

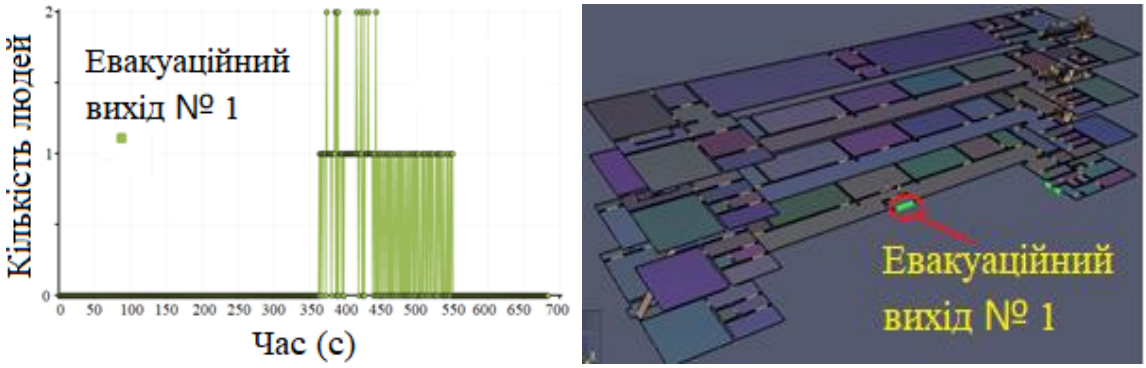


Рис. 6. Час евакуації через евакуаційний вихід № 1

Щодо загального часу евакуації, який становить 687 с, рух решти осіб, які не користувались дверми № 7 та евакуаційним виходом № 1 відбувається через сходову клітину, де евакуаційний вихід вважається не блокованим.

5.2. Результати визначення часу блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі

У моделі розвиток швидкості тепловиділення регулювався за рахунок встановленої швидкості розповсюдження полум'я по поверхні горіння у приміщенні. Відповідну залежність швидкості тепловиділення та масової швидкості вигорання пожежної навантаги подано на рис. 7.

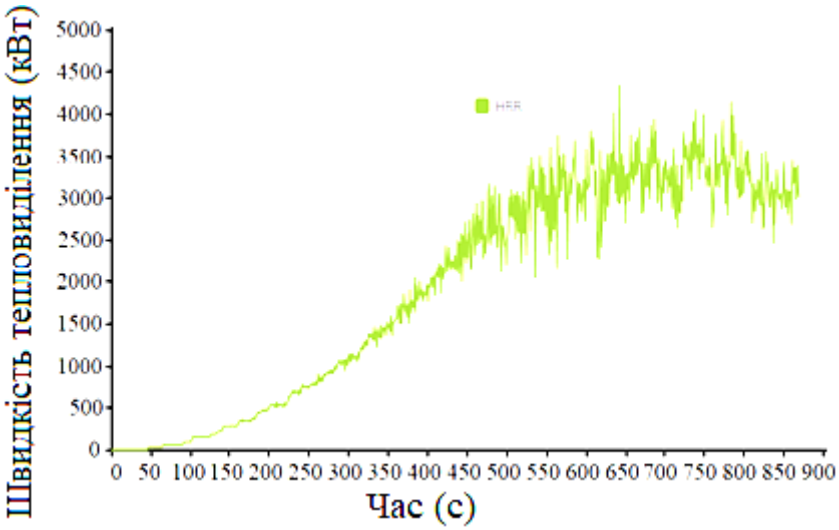


Рис. 7. Промодельоване зростання швидкості тепловиділення у часі

Для визначення часу блокування шляхів евакуації у моделі розташовані датчики вимірювання температури газо-фазного середовища (t), видимості (VIS), концентрації кисню (O_2) та концентрації чадного газу (CO). Висота розташування датчиків від підлоги відповідає становить 1,7 м. Загальна кількість – 44 одиниці.

Розміщення датчиків наступне (t,VIS,O_2,CO):

- датчики 1–4 – біля входів до сходової клітини що розташована ліворуч, яке веде до заблокованого виходу (сходова клітина № 1);
- датчики 5–8 – біля входів до сходової клітини що розташована праворуч, яка веде до вільного виходу (сходова клітина № 2);
- датчик 9 – перший евакуаційний вихід (exit 1);

- датчик 10 – другий евакуаційний вихід (exit 2);
- датчик 11– вихід з приміщення, де відбувається пожежа (fire).

Відповідне розташування датчиків на сходових клітинах подано на рис. 8.

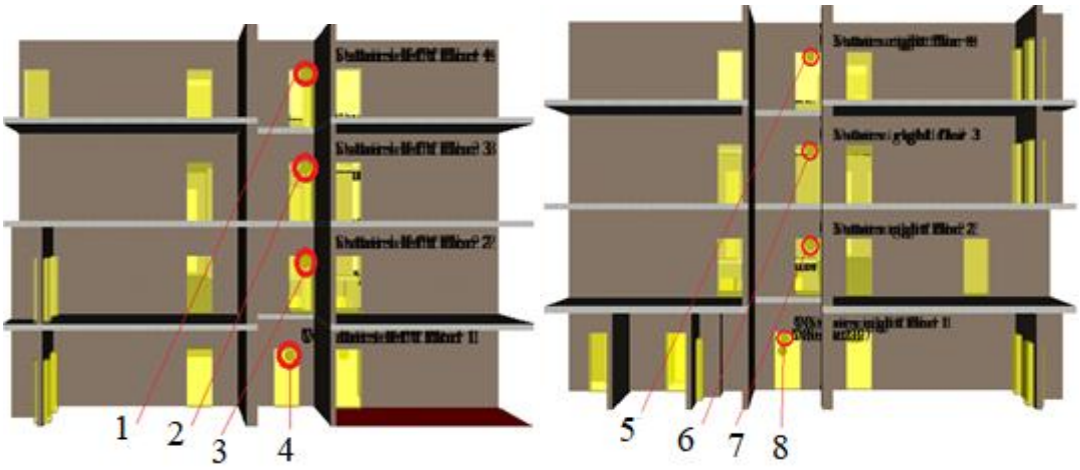


Рис. 8. Розташування датчиків на сходових клітинах

Розташування датчиків біля першого, другого евакуаційного виходу та виходу з приміщення де відбувається пожежа подано на рис. 9.

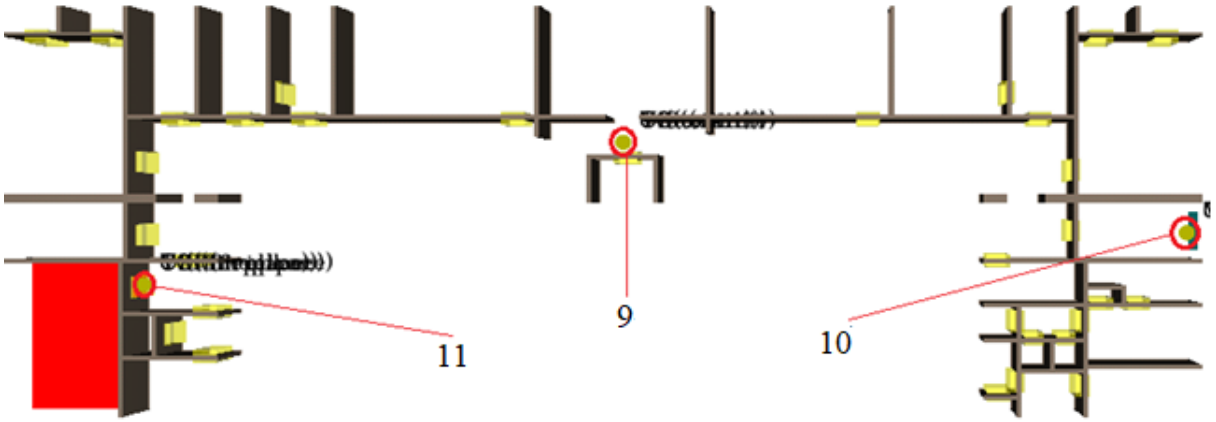


Рис. 9. Розташування датчиків біля першого, другого евакуаційного виходу та виходу з приміщення де відбувається пожежа

Результати моделювання розвитку небезпечних чинників пожежі.

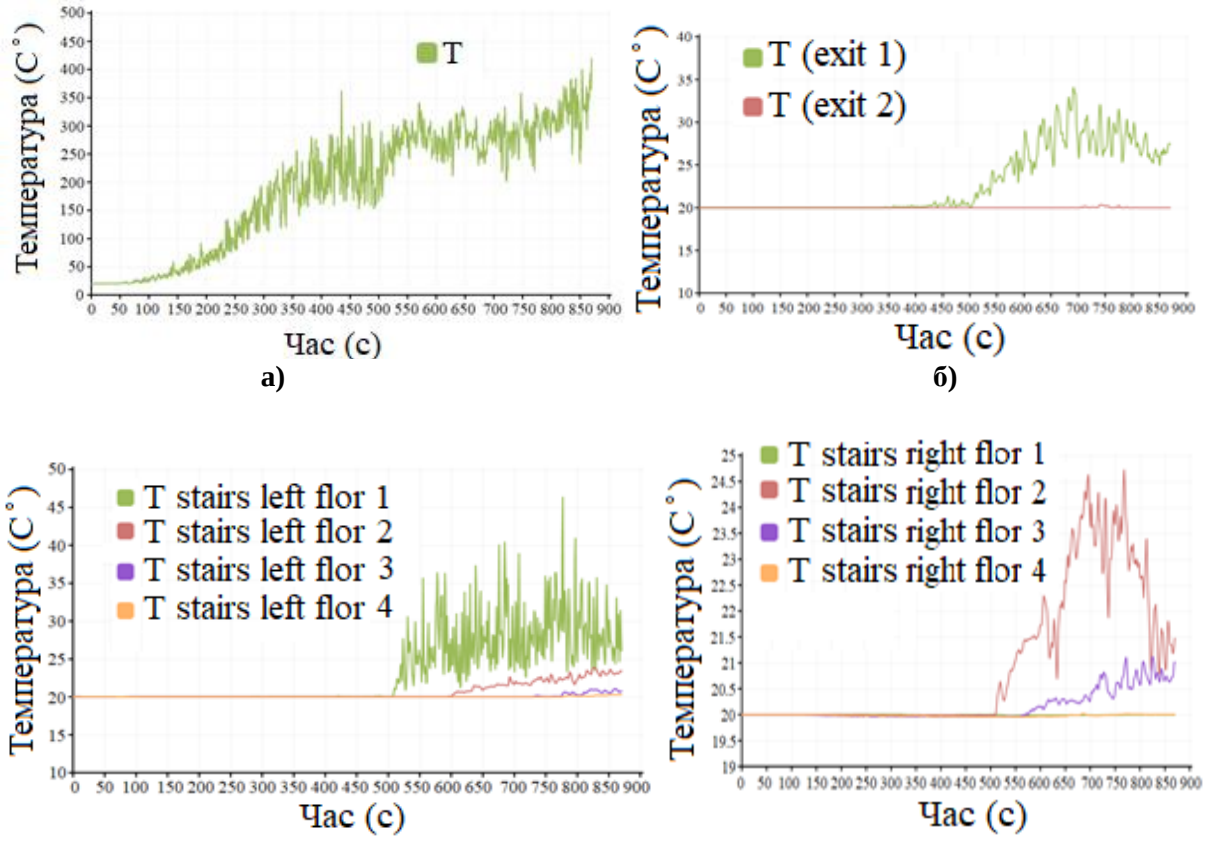
На рис. 10 подано залежність зміни температури (t) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виході з приміщення де відбувається пожежа та на сходових клітинах.

На рис. 11 подано зміну втрати видимості (VIS) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виходи з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.

На рис. 12 подано зміну концентрації кисню (O_2) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виходи з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.

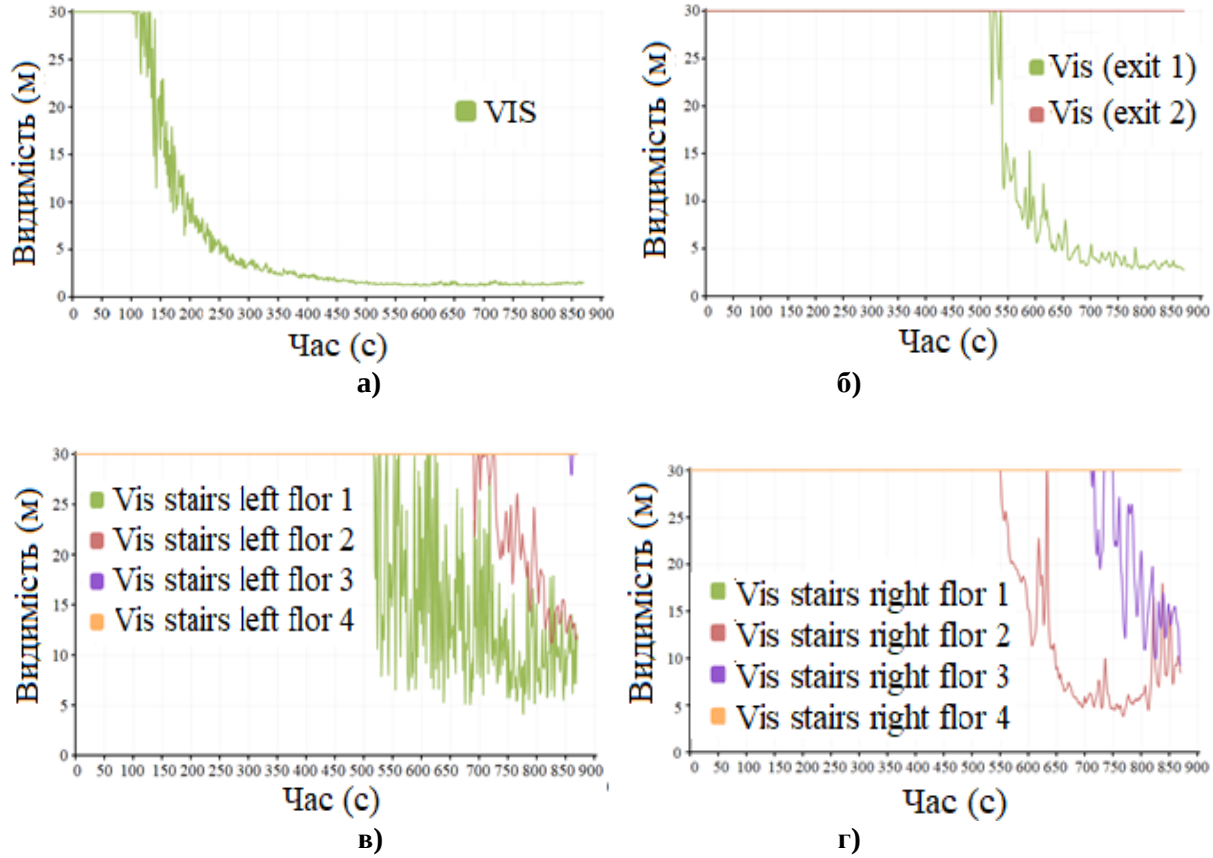
На рис. 13 подано підвищення концентрації чадного газу (CO) у часі для кожного з датчиків на відповідному евакуаційному виході, виходи з приміщення, де відбувається пожежа та сходових клітинах.

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.



а) б) в) г)

Рис 10. Зміна температури (t) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходова клітина № 1; г – сходова клітина № 2



а) б) в) г)

Рис. 11. Зміна видимості (VIS) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходова клітина № 1; г – сходова клітина № 2

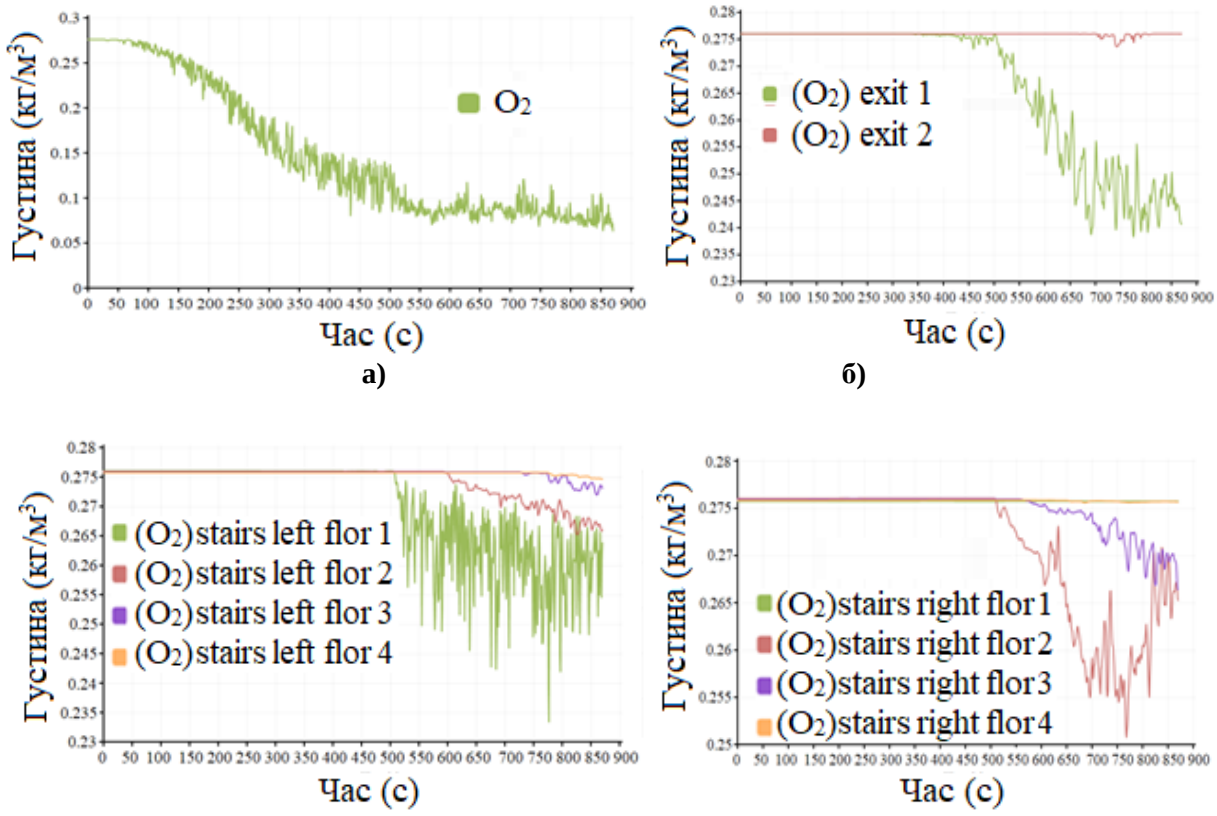


Рис. 12. Зміна густини кисню (O_2) для кожного з датчиків: а– fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходова клітина № 1; г – сходова клітина № 2

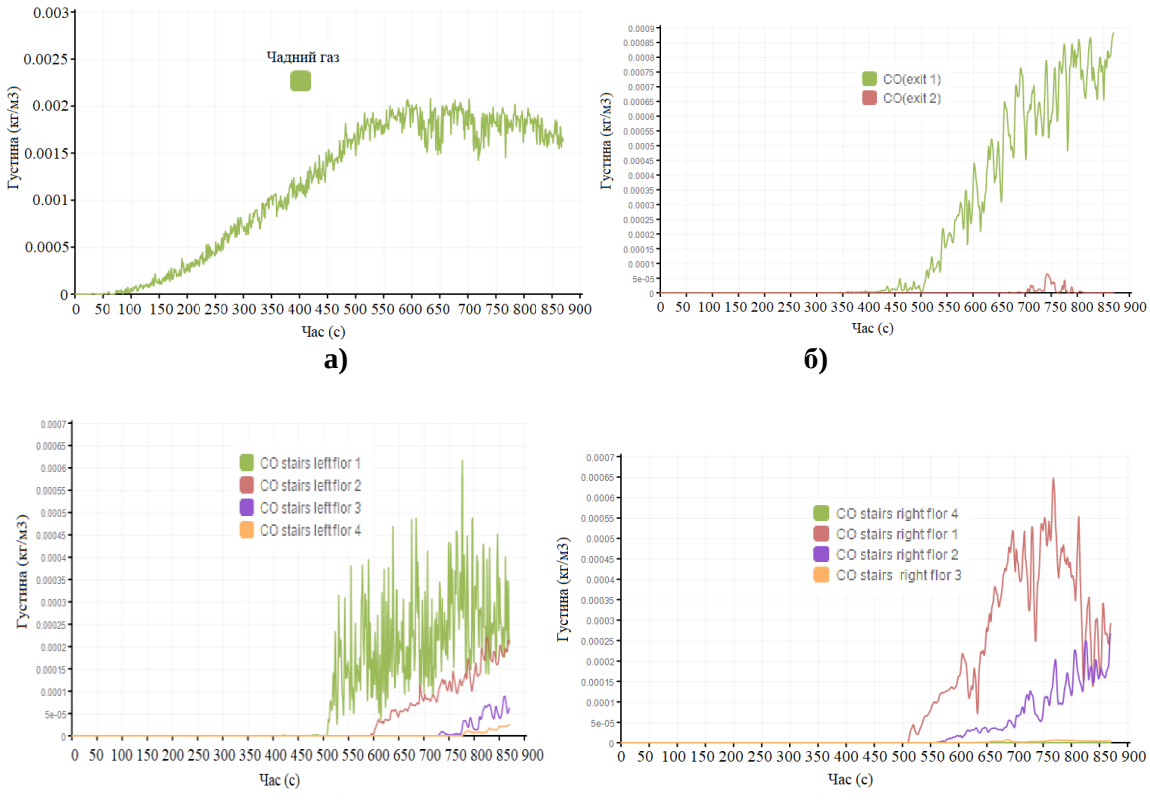
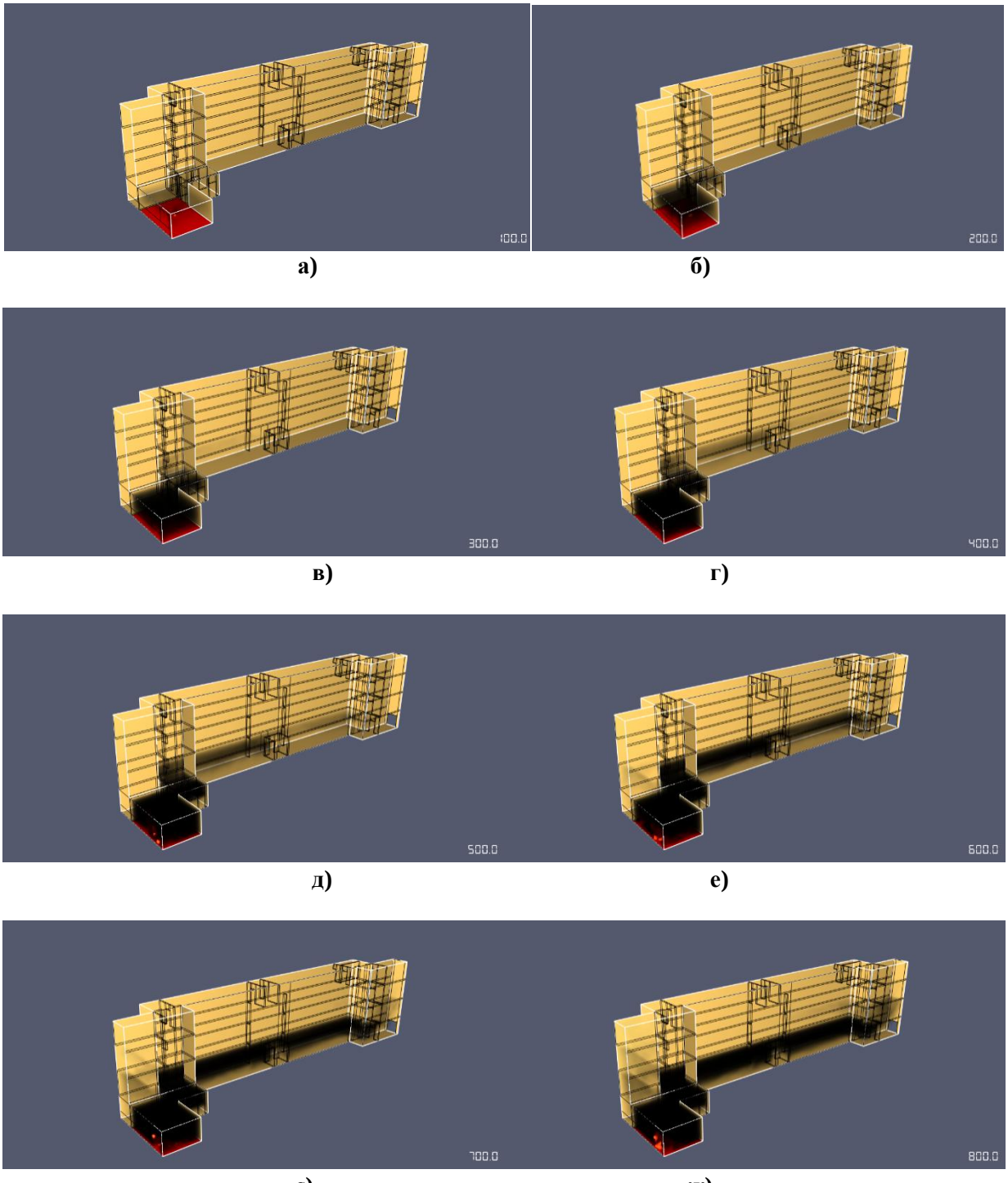


Рис. 13. Зміна густини чадного газу (CO) для кожного з датчиків: а – fire place; б – exit 1, exit 2; в – сходова клітина № 1; г – сходова клітина № 2

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

На рис. 14 подано візуалізацію розповсюдження диму у моделі навчального закладу на протязі 800 с. моделювання з інтервалом 100 с.



а) **б)**

в) **г)**

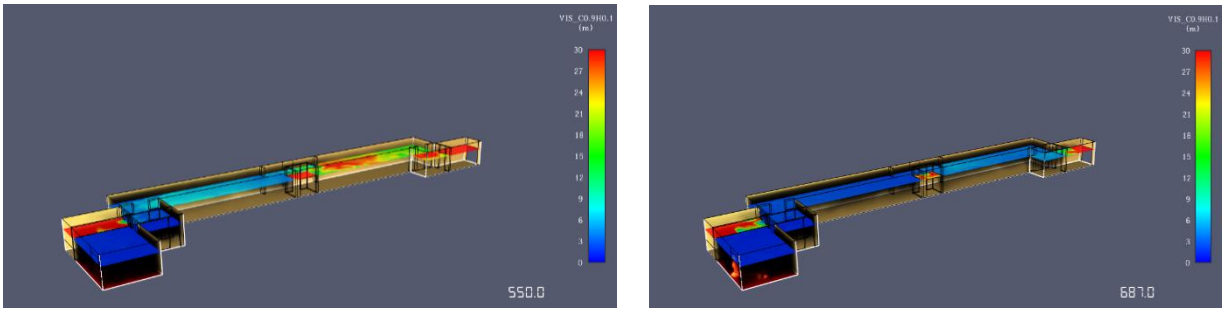
д) **е)**

є) **ж)**

Рис. 14. Візуалізація розповсюдження диму у моделі школи протягом 800 с моделювання: а – 100 с; б – 200 с; в – 300 с; г – 400 с; д – 500 с; е – 600 с; є – 700 с; ж – 800 с

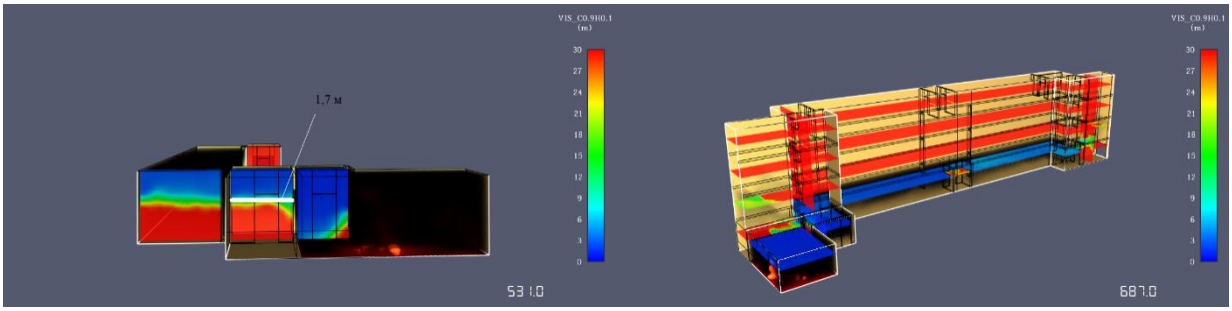
На рис. 15 подано візуалізацію зниження видимості по першому поверху школи на висоті 1,7 м біля евакуаційних виходів № 1 та № 2 протягом часу евакуації.

На рис. 16 подано візуалізацію зниження видимості протягом часу евакуації біля дверей 7, та сходових клітинах, що ведуть до евакуаційних виходів № 1 та № 2.



а) **б)**

Рис. 15. Візуалізація зниження видимості по першому поверху школи на висоті 1,7 м: а – евакуаційний вихід № 1, 550 с; б– евакуаційний вихід № 2, 687 с



а) **б)**

Рис. 16. Візуалізація зниження видимості: а – біля дверей № 7 на першому поверху школи на 531 с на висоті 1,7 м; б – зниження видимості на 2-4 поверсі сходової клітини № 1 та 1-4 поверсі сходової клітини № 2 на 687 с

Зведені результати дослідження, щодо блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі подано у табл. 3.

Табл. 3. Час блокування евакуаційних шляхів та виходів небезпечними чинниками пожежі

Час проходження останньої людини, с.		Час загальної евакуації 687 с			
		Температура, °С	Видимість, м	Густина кисню, кг/м^3	Густина чадного газу, кг/м^3
Евакуаційний вихід №1	550	≤35	≤9	≥0,226	$\leq 1{,}16 \cdot 10^{-3}$
Евакуаційний вихід №2	687	=20	≥20	≥0,226	$\leq 1{,}16 \cdot 10^{-3}$
Сходова клітина № 1	531	≤46	≤6	≥0,226	$\leq 1{,}16 \cdot 10^{-3}$
Сходова клітина № 2	687	=25	≥20	≥0,226	$\leq 1{,}16 \cdot 10^{-3}$

Серед небезпечних чинників пожежі, значення, вище за гранично допустимі норми на протязі періоду евакуації зафіксовано для видимості. Таким чином біля евакуаційного виходу видимість знижується на 55 %, а на шляхах до виходу близько 70 %.

6. Обговорення результатів виявлення особливостей часу евакуації при пожежі

Результати, отримані при дослідженні, підтверджують раніше запропоновану гіпотезу. Завдяки отриманим результатам виявлено, що за чинними

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

ДСТУ 8828:2019 та ДБН В.2.5-56:2014 у частині систем оповіщення і відповідно «часу до початку евакуації» є доцільним внесення змін. А саме забезпечення типових будівель закладів середньої освіти системами оповіщення іншого типу, або нормування «часу до початку евакуації», що запропоновано у ДСТУ 8828:2019. Наприклад, збільшення встановленого значення, оскільки, від цього залежить достовірна оцінка рівня прийняття відповідних рішень для забезпечення належного рівня пожежної безпеки.

Таким чином, щодо критичних значень небезпечних чинників пожежі на шляхах до евакуаційних виходів та безпосередньо біля евакуаційних виходів визначено наступне:

– результати зафіксованої температури не перевищують гранично допустимі значення (рис. 10, табл. 3.) протягом загального часу евакуації , отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за температурою не відбувається.

– результати зафіксованої густини кисню не перевищують гранично допустимі значення (рис. 12, табл. 3.) протягом загального часу евакуації , отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за зниженням густини кисню не відбувається.

– результати зафіксованої густини чадного газу не перевищують гранично допустимі значення (рис. 13, табл. 3.) протягом загального часу евакуації , отже блокування евакуаційних виходів, та шляхів, які ведуть до евакуаційних виходів за підвищенням густини чадного газу не відбувається.

– результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення (рис. 11, табл. 3). Шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с. Таким чином на момент проходження останньої особи через сходову клітину та двері № 7 (рис. 5) видимість складає вже ≤6 м (табл. 3), отже евакуація через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання особа проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с (рис. 4), де значення видимості становить ≤9 м (табл. 3), що теж є перевищенням гранично допустимих значень.

Виявленні особливості, відображені у табл. 3 та рис. 4, рис. 5, рис. 11, на відміну від [5–7, 9, 11] повноцінно визначають залежність взаємозв’язку між часом початку евакуації та системами оповіщення та їх загальний вплив на оцінку рівня пожежної безпеки об’єкту на прикладі типового закладу середньої освіти.

Як обмеження проведеного дослідження слід враховувати, що застосувалась однотипна модель будівлі закладу середньої освіти. Доцільно варіювати різноманітні конфігурації будівель та споруд різної форми для розробки кількісної бази, яка задовольняла потребам під час моделювання. Також слід зазначити, що використано одну стратегією евакуації, а саме рух до найближчих виходів найкоротшим шляхом. При варіюванні різних стратегій руху час евакуації може бути знижений.

До недоліків даного дослідження слід віднести знехтування щодо створення окремого профілю кожної особи з індивідуальною реакцією відгуку на сповіщення про тривогу та типом поведінки у разі евакуації. Зазначена індивідуальність кожного профілю також має вплив на загальний час евакуації та є близькою до реальних умов. В перспективі, зазначений недолік може бути усунений шляхом створення матриць індивідуальних профілів, у тому числі з відмінними реакціями відгуку осіб, в залежності від функціонального призначення будівлі.

Розвиток дослідження у подальшому полягає у корегування відповідної методики/нормативних документів стосовно кількісної оцінки «часу до початку евакуації» та вимог обладнання будівель системами оповіщення. Це дозволить ефективно перевіряти та забезпечувати належний рівень пожежної безпеки об'єктів різного функціонального призначення. Серед труднощів, з якими можна зіткнутися, це необхідність проведення багатоповторних дослідів щодо визначення часу евакуації з будівель шляхом натурних експериментів.

7. Висновки

1. Визначено час евакуації при пожежі з урахуванням часу спрацювання системи оповіщення з типового закладу середньої освіти шляхом комп'ютерного моделювання. При визначенні враховано існуючі об'ємно-планувальні рішення будівлі, кількість осіб та їх категорії мобільності та площі горизонтальних проекцій згідно рекомендації ДСТУ 8828:2019. Відповідно ДБН В.2.5-56:2014, заклад середньої освіти забезпечено III типом СО. Враховуючи зазначене «час до початку евакуації» становив 360 с, згідно з ДСТУ 8828:2019. З урахування обраних параметрів, загальний час евакуації із будівлі склав 687 с. При цьому рух останньої людини через шлях до евакуаційного виходу № 1 становив 531 с, а останній момент проходження людини через евакуаційній вихід № 1 становив 550 с.

2. Визначено час блокування шляхів евакуації небезпечними чинниками пожежі. Результати зафіксованої температури не перевищили 46 ^{o}C. Значення густини не зафіксовано нижче ніж ≥0,226 кг/м^3, густина чадного газу не перевищувала значення ≤1,16·10^{-3} кг/м^3, протягом загального часу евакуації. Отримані значення нижче, ніж гранично допустима норма НЧП за ДСТУ 8829, отже за визначеними НЧП блокування шляхів та евакуаційних виходів не відбувається. Результати зафіксованої видимості перевищують гранично допустимі значення. Таким чином шлях до евакуаційного виходу № 1 використовуючи сходову клітину № 1 відбувається через двері № 7. Рух через ці двері триває протягом 531 с, отже на момент проходження останньої людини через сходову клітину та двері № 7 видимість складає вже ≤6 м. Отже евакуація учнів через сходову клітину № 1 небезпечна. Окрім того, остання людини проходить через двері евакуаційного виходу № 1 на 550 с, де значення видимості становить ≤9 м (табл. 3), що теж є перевищення гранично допустимих значень, відповідно до вимог ДСТУ 8829.

Отже запропоновану кількісну оцінку «часу до початку евакуації» для закладів середньої освіти у розглянутій методиці ДСТУ 8828:2019, що відповідає типу системи оповіщення, згідно ДБН В.2.5-56:2014, необхідно переоглядати та корегувати.

Література

1. Ковалишин В. В., Оношко І. В. Аналіз методології оцінювання пожежних ризиків. Пожежна безпека. 2022. № 41. С. 94–102. doi: 10.32447/20786662.41.2022.11

2. SFPE Guide to Human Behavior in Fire. Springer International Publishing. 2019. doi: 10.1007/978-3-319-94697-9

3. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Springer New York. 2016. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0

4. 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

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

5. 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

6. 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

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. 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

12. Кошмаров Ю. А. Прогнозування небезпечних чинників пожежі, 2000. 118 с.

S. Shakhov, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
S. Vinogradov, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
E. Rybka, *DSc, Professor, Deputy Head of the Center – Head of Department*
S. Garbuz, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
K. Ostapov, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF DETERMINING THE TIME OF EVACUATION OF PEOPLE FROM BUILDINGS IN CASE OF FIRE

The object of the study is the safe evacuation time of people in case of fire from a typical secondary education institution. The problem was solved, which consisted in the inconsistency of the quantitative assessment of «pre-evacuation time» set out in DSTU 8828:2019, which is regulated by the requirements of DBN B.2.5-56:2014, with today's conditions, when determining the safe time of evacuation from buildings and structures. Thanks to the obtained results, features were revealed that fully determine the dependence of the relationship between the pre-evacuation time and warning systems on the example of a typical secondary education institution. The evacuation time was determined according to DSTU 8828:2019, taking into account the requirements of DBN B.2.5-56:2014. The total evacuation time from the building was 687 s. The time of blocking evacuation routes and evacuation exits by dangerous fire factors is determined. The results of the recorded temperature did not exceed 46 ^{o}C, the value of oxygen was not recorded lower than ≥0,226 kg/m^3, the density of carbon monoxide was not more than ≤1,16·10^{-3} kg/m^3 during the total evacuation time, which meets the requirements of fire safety. The results of the recorded visibility exceed the maximum permissible values. Thus, the path to evacuation exit № 1 using stairwell № 1 takes place through door № 7. Movement through this door lasts for 531 s, therefore, now when the last person passes through stairwell and door № 7, the visibility is already ≤6 m. Therefore, evacuation through stairwell № 1 is dangerous. In addition, the last person passes through the door of the evacuation exit № 1 for 550 s, where the visibility value is ≤9 m, which is also an excess of the maximum permissible values, according to the requirements.

Keywords: evacuation, warning systems, fire hazards, educational institutions, PathFinder, PyroSim

Referense

1. SFPE Guide to Human Behavior in Fire. (2019). Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-94697-9

2. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. (2016). Springer New York. doi: 10.1007/978-1-4939-2565-0

3. Onoshko, I., Kovalyshyn, V. (2022). Analysis of fire risk assessment methodology. Fire safety, 41, 94–102. doi: 10.32447/20786662.41.2022.1112.

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. 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

12. Koshmarov, U. (2000). Prediction of dangerous factors of fire

Надійшла до редколегії: 19.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

© С. М. Шахов, С. А. Виноградов, Є. О. Рибка, С. В. Гарбуз та ін.

УДК 519.6, 614.844

Д. П. Дубінін*[1]*, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8948-5240)*
К. В. Коритченко*[2]*, *д.т.н., с.н.с, зав. каф. (ORCID 0000-0002-1005-7778)*
Є. М. Криворучко*[1]*, *викл. каф. (ORCID 0000-0001-7332-9593)*
С. Ю. Рагімов*[1]*, *к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0002-8639-3348)*
В. В. Тригуб*[1]*, *к.т.н., доцент, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-5370-1340)*
[1]Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна
[2]Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ ВОДОЮ СТВОЛА УСТАНОВКИ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПЕРІОДИЧНО-ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ

Проведені дослідження, які дозволили виявити особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. При цьому обґрунтовано та запропоновано математичну модель для моделювання процесів нагнітання води у трубу з подальшим подрібненням води ударною хвилею. Для моделювання процесів нагнітання води та подрібненням води у стволі установки застосовано VOF-модель (модель об'єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє, та яка базується на методі відстежування поверхні, що застосовується до фіксованої ейлерової сітці. На підставі розробленої математичної моделі у програмному середовищі ANSYS проведені чисельні дослідження процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. За результатами чисельного дослідження процесу заповнення ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії водою виявлено порівняно високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до газодетонаційних процесів, що відбуваються в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Зокрема, інтервал часу між циклами детонації в установці, що працює на частоті 23 Гц, складає близько 43,5 мс. Якщо відкинути цикл продувки, то маємо інтервал часу у 21 мс, за який необхідно вприснути воду у ствол установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. За результатами наведених досліджень маємо, що тільки час розповсюдження цівки води з однієї до іншої сторони ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії складає 8 мс. Проведені дослідження дають змогу дослідити вплив параметрів роботи установки пожежогасіння на формування дрібнорозпиленого водяного струменя, а отримані результати значно підвищать рівень оперативної готовності особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час проведення оперативних дій з гасіння внутрішніх пожеж.

Ключові слова: установка пожежогасіння, дрібнорозпилені водяні струмені, математична модель, чисельні дослідження

1. Вступ

На сьогоднішній день найбільш перспективним та ефективним напрямком щодо використання води для цілей пожежогасіння є застосування технічних засобів пожежогасіння дрібнорозпиленими водяними струменями, що мають ряд переваг [1]. При цьому для досягнення цих переваг необхідно створити відповідні умови. Досягаються дані умови забезпеченням достатньої дисперсності вогнегасної речовини та рівномірного розподілу крапель води у зоні горіння. Такі засоби пожежогасіння забезпечують зростання ефективності використання води, з відповідним зменшенням витрати води [2]. Це досягається за рахунок того, що під час застосування дрібнорозпилених водяних струменів поверхня охолодження збільшується, в залежності від дисперсності, за питомим відношенням з 0,18 л/м^2 до 0,017 л/м^2. Цим забезпечується прискорене зниження температури в закритих приміщеннях від критичної 1000 °С до 40 °С [3]. Тому розвиток техніки гасіння пожеж дрібнорозпиленими водяними струменями направлено на удосконалення технічних засобів пожежогасіння за рахунок розміру крапель води (дисперсності) та інтенсивності подавання вогнегасної речовини.

В якості технічного засобу пожежогасіння дрібнорозпиленими водяними струменями є установка пожежогасіння періодично-імпульсної дії (далі – установка пожежогасіння), принцип роботи якої наведена в роботах [4, 5]. При цьому для дослідження процесів формування дрібнорозпилених водяних струменів, що відбуваються в установці пожежогасіння доцільно застосувати математичне моделювання. При цьому використання математичного апарату і сучасної обчислювальної техніки дозволяє скоротити матеріальні затрати на дослідження різних складних процесів. Розглянемо можливість застосування математичного моделювання для чисельного дослідження процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння.

Актуальність роботи викликана, насамперед, потребою подальшого розвитку технічних засобів пожежогасіння дрібнорозпиленими водяними струменями.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Подрібнення води ударною хвилею відноситься до перспективних способів. Так, в роботі [6] проведені експериментальні дослідження з вивчення взаємодії між горизонтальним шаром води та плоскою ударною хвилею, що проходить вздовж її поверхні. За результатами досліджень встановлено, що при ударній хвилі з числом Маха 1,11 на відображенні повітря-вода спостерігаються «бризки» з деякими макроскопічними крапельками води, при ударної хвилі з числом Маха 1,43 відбувається формування водяного туману з мікроскопічних крапель. Це свідчить про доцільність зростання інтенсивності ударної хвилі для ефективного отримання водяного туману.

В роботі [7] представлені результати експериментальних досліджень щодо подрібнення води за рахунок вибуху заряду, що знаходиться у ємностях з водою. Запропонований спосіб розпилення води є ефективним, але потребує застосування вибухових речовин, що є небезпечним при застосуванні.

В роботі [8] представлені технічні засоби отримання водяного туману за рахунок ультразвукової технології. При цьому способі розпилення отримується дрібнорозпилена вода з дисперсністю в межах 5–20 мкм за низької продуктивності, що є не ефективним для задач пожежогасіння.

В роботі [9] проведені експериментальні та чисельні дослідження ударно-хвильової дії на циліндричну цівку води, що проводилися в стволі 4×150 мм, обладнаній голографічною інтерферометрією. За результатами проведених досліджень встановлено, що на розглянутий час моделювання дії ударної хвилі на водяний стовп він не деформувався від початкової форми. Відбиття і проходження ударної хвилі в повітрі схожі на ті, що виникають при відбитті ударної хвилі від твердого циліндром. Тому можна зробити висновок, що на цій ранній стадії взаємодії ударної хвилі з товщею води поле потоку нагадує поле відбиття ударної хвилі від твердого циліндру. Як тільки стовп води почне деформуватися, ці подібності припиняються. При цьому слід зазначити, що дослідження проводилися при застосуванні малогабаритного обладнання. Тому отриманні результати можуть бути застосовані для визначення лише принципу подрібнення краплі води.

В роботі [10] проведені чисельні дослідження щодо взаємодії між детонаційною хвилею, що поширюється, і круговою водяною хмарою в водневоповітряній суміші. За результатами досліджень встановлено, що критичний розмір хмари для гасіння детонації зменшується, коли концентрація крапель збільшується. Окрім цього встановлено, що вища концентрація крапель призводить до

© Д. П. Дубінін, К. В. Коритченко, Є. М. Криворучко, С. Ю. Рагімов та ін.

ширшого діапазону дисперсії крапель через більші завихрення. Але слід зазначити, що результати дослідження отриманні тільки розрахунковим шляхом та не підтверджені експериментально.

Результати наведених досліджень не дозволяють оцінити ефективність формування дрібнодисперсного водяного струменя, що надходить зі ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. В роботах [4, 5] авторами проведені дослідження, щодо ефективності застосування газодетонаційних технологій під час формування та подачі дрібнорозпилених водяних струменів для гасіння пожеж. Тому, проведення досліджень, щодо процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії є визначальним при оцінці дисперсності формування дрібнодисперсних водяних струменів та інтенсивності їх подавання для гасіння пожеж.

3. Мета і завдання дослідження

Метою даної роботи є виявити особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– розробити математичну модель процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння;

– провести чисельні дослідження процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом дослідження є процес заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Предметом дослідження – особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії для формування та подачі дрібнорозпиленого водяного струменя під час гасіння внутрішніх пожеж.

Основною гіпотезою є оптимізація роботи установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії при формуванні дрібнорозпиленого водяного струменя за рахунок проведення математичного моделювання.

В якості математичної моделі запропоновано VOF-модель (модель об’єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє, та яка базується на методі відстежування поверхні, що застосовується до фіксованої ейлерової сітки. Обчислення математичної моделі здійснювалося тиско-базисним методом за допомогою програмного забезпечення ANSYS.

5. Розробка математичної моделі заповнення водою ствола установки пожежогасіння

Дослідження процесу формування дрібнодисперсного водяного струменя здійснювалось за умов, подібних до умов подрібнення вогнегасної речовини в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Відповідно, процес формування дрібнорозпилених водяних струменів відбувався у стволі діаметром 20 мм (рис. 1).

За першою півзадачею (заповнення ствола водою), в ствол через отвір діаметром 2 мм подавалась вода на протязі 60 мс. Ця тривалість подавання води відповідає різниці у часі між детонаційними імпульсами установки, що розроблена. Подавання води відбувалось на відстані 100 мм від закритого торця ствола (області генерування ударної хвилі) та 300 мм від відкритого торця ствола. Відкритий торець ствола

розміщувався у камері діаметром 150 мм та довжиною 250 мм. Ствол входив у камеру на глибину 60 мм Після часткового заповнення ствола водою відбувалось генерування ударної хвилі детонації в стволі. Для створення ударної хвилі в області моделювання I задавалась наявність стисненого газу. Початковий тиск газу у області I дорівнював 1,9 МПа, а його температура дорівнювала 300 К. Довжина цієї області дорівнювала 600 мм.

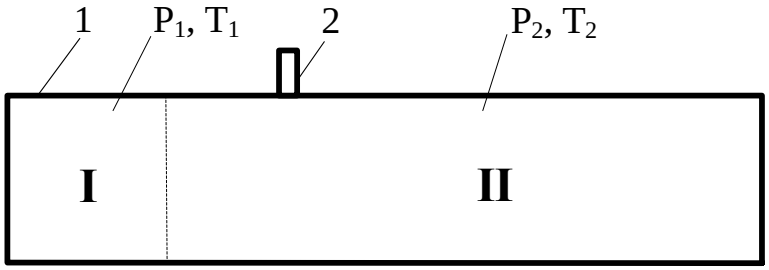


Рис. 1. Схема постановки задачі дослідження: 1 – ствол d=20 мм; 2 – отвір для подачі води d=2 мм; I – область газу високого тиску; II – область газу низького тиску

Під час заповнення ствола водою приймалось, що зовнішні збурення повітря у стволі відсутні (швидкість газового потоку на вході та виході з ствола дорівнює нулю). Приймалось, що ствол розташовувався паралельно земної поверхні, тобто сила тяжіння спрямована перпендикулярно до осі ствола. Подавання води відбувається з отвору, розташованого зверху ствола.

Програмне середовище ANSYS дозволяє провести розрахунок течії у двофазних середовищах за розглянутих умов. Для дослідження процесу застосовано VOF-модель (модель об'єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє. Згідно [11], у VOF моделі єдиний набір рівнянь імпульсу використовується для рідин, а об'ємна частка кожної рідини в кожній обчислювальній комірці відстежується по всій області. Область застосування моделі VOF включає, в тому числі, заповнення рідиною газового середовища та прогнозування розпаду струменя рідини у газовому середовищі.

Рівняння нерозривності для об'ємної фракції кожної фази (газ/рідина) набуває вигляду [11]:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q\rho_q\right)+\nabla\cdot\left(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\right)=S_{\alpha_q}+\sum_{p=1}^{n}\left(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp}\right)\right], \quad (1)$$

де $\dot{m}_{qp}$ – передача маси від фази q до фази p; $\dot{m}_{pq}$ – передача маси від фази p до фази q; α_q – об'ємна фракція q-ї фази; ρ_q – густина q-ї фази; t – час; S_{α_q} – джерельний член маси; $\vec{v}_q$ – швидкість q-ї фази.

Об'ємна частка первинної фази обчислювалась на основі наступного обмеження [11]:

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q=1. \quad (2)$$

Об'ємна частка фази визначалась за неявною схемою дискретизації часу за рівнянням [11]:

© Д. П. Дубінін, К. В. Коритченко, Є. М. Криворучко, С. Ю. Рагімов та ін.

$$\frac{\alpha_q^{n+1}\rho_q^{n+1}-\alpha_q^{n}\rho_q^{n}}{\Delta t}V+\sum_f\left(\rho_q^{n+1}U_f^{n+1}\alpha_{q,f}^{n+1}\right)=\left[S_{\alpha_q}+\sum_{p=1}^{n}\left(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp}\right)\right]V, \quad (3)$$

де n – індекс для попереднього кроку за часом; n + 1 – індекс для наступного кроку за часом; $\alpha_{q,f}$ – поверхнева величина об'ємної фракції q-ї фази; V – об'єм розрахункової комірки; U_f – об'ємний потік через поверхню за нормаллю швидкості.

Осереднена густина рідини визначалась за рівнянням [11]:

$$\rho=\sum\alpha_q\rho_q\,. \quad (4)$$

Рівняння кількості руху має вигляд [11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\vec{v}\right)+\nabla\cdot\left(\rho\vec{v}\vec{v}\right)=-\nabla\rho+\nabla\cdot\left[\mu\left(\nabla\vec{v}+\nabla\vec{v}^{T}\right)\right]+\rho\vec{g}+\vec{F}, \quad (5)$$

де p –тиск; μ – молярна маса; g – прискорення вільного падіння; $\vec{F}$ – джерельний член імпульсу.

Рівняння енергії має вигляд [11]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho E\right)+\nabla\cdot\left(\vec{v}\left(\rho E+\rho\right)\right)=\nabla\cdot\left(k_{eff}\nabla T\right)+S_h, \quad (6)$$

де E – осереднене значення енергії; T – осереднена температура; S_h – джерельний член енергії; k_{eff} – коефіцієнт ефективною теплопровідності.

6. Результати чисельних досліджень процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння

Відображення процесу заповнення ствола водою відстежимо за зміною об'ємної частки води у двофазній газорідинній суміші. Результати розрахунку відображено на рис. 2.4 – рис. 2.9. Кольорова шкала об'ємної частки води від 0 (0 %) до 1 (100%) відображена з лівої сторони рисунків. На рис. 2 спостерігаємо початок впорскування води до ствола установки.

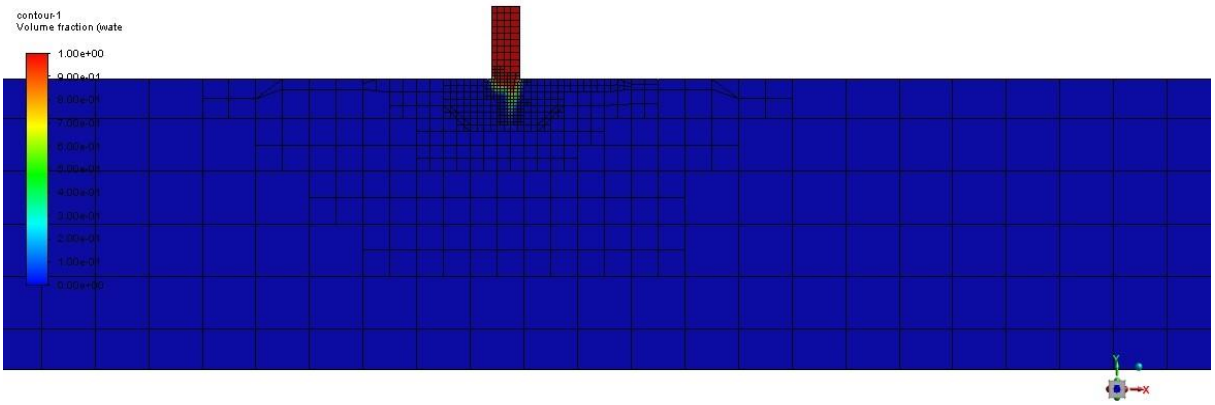


Рис. 2. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 1 мс

На рис. 3 спостерігаємо досягнення цівки води протилежної сторони ствола. При цьому, розпилення води практично не відбувається. Виходячи з розрахункового інтервалу між початком впорскування води та досягненням протилежного торця ствола, що дорівнює 8 мс, та відстанню, що дорівнює діаметру ствола у 20 мм, маємо швидкість розповсюдження цівки води, що дорівнює 2,5 м/с. За результатами експериментальних досліджень роботи [12] отримано, що швидкість цівки води у сопла досягає близько 10 м/с за високого тиску нагнітання. Тобто, отримані результати співпадають за порядком величини, що підтверджує їх достовірність.

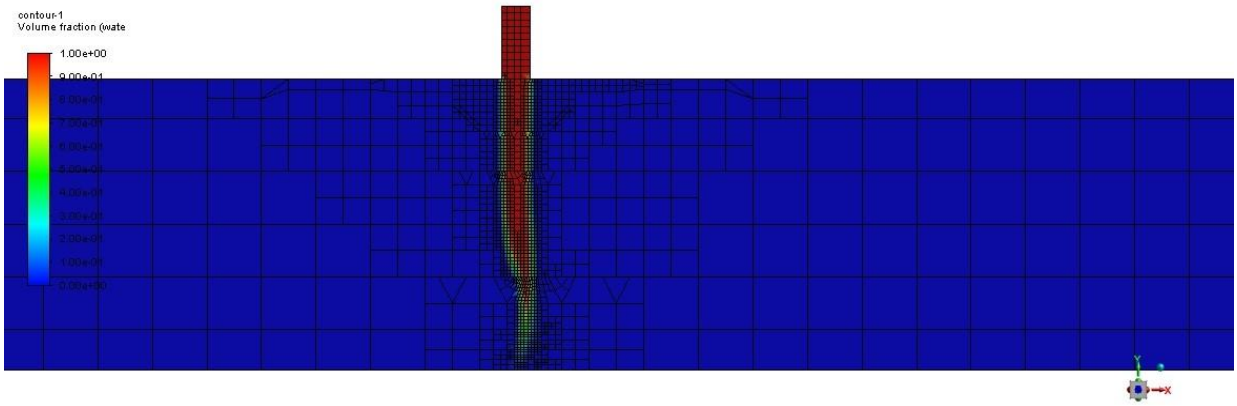


Рис. 3. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 9 мс

На рис. 4 спостерігаємо, що після досягнення стінки ствола у подальшому відбувається розтікання води вздовж нижньої стінки ствола під дією сили тяжіння.

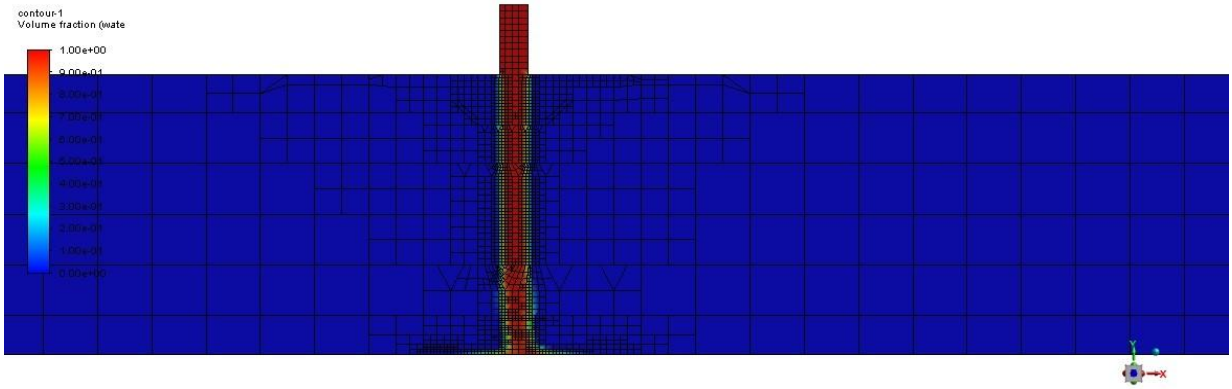


Рис. 4. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 15 мс

На рис. 5 спостерігаємо припинення впорскування води у ствол установки, що відображається нульовою об'ємною концентрацією води в стволі впорскування. Також спостерігаємо, що вода розтіклася по нижній стінці ствола 1.

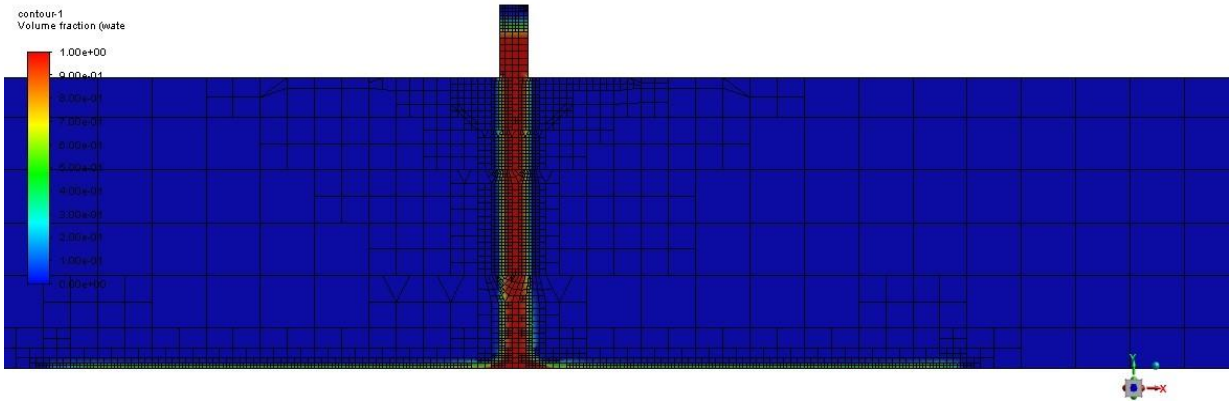


Рис. 5. Розподіл об'ємної частки води у розрахунковій області на час 60 мс

© Д. П. Дубінін, К. В. Коритченко, Є. М. Криворучко, С. Ю. Рагімов та ін.

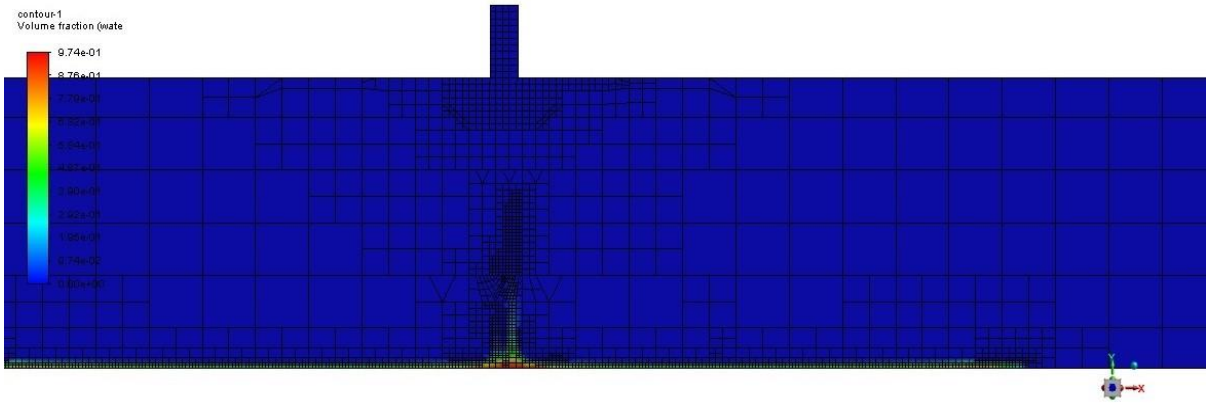


Рис. 6. Розподіл об’ємної частки води у розрахунковій області на час 77 мс

На рис. 7 спостерігаємо, що на протязі понад 60 мс після розпаду цівки води вода перебуває на нижній стінці ствола практично у незмінному стані.

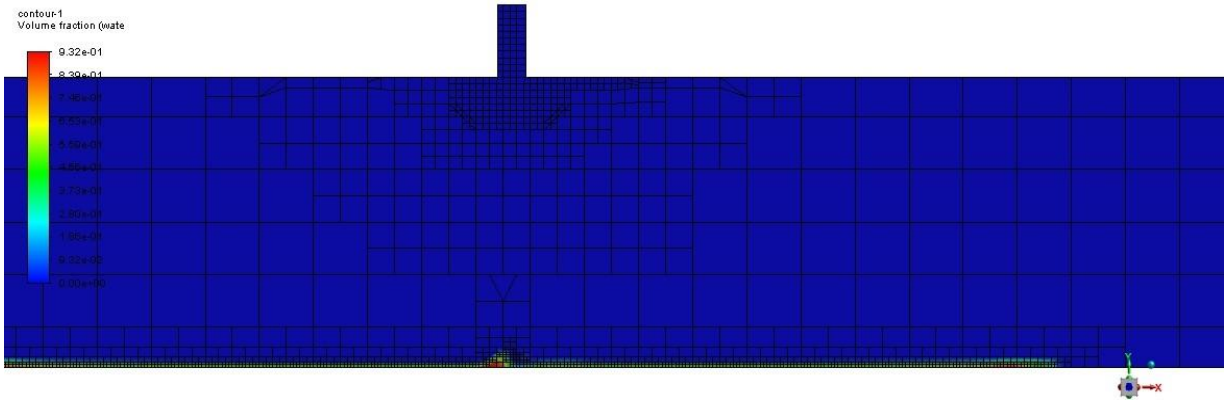


Рис. 7. Розподіл об’ємної частки води у розрахунковій області на час 140 мс

Як показали результати експериментальних досліджень інших дослідників [6–10], під час розповсюдження ударної хвилі вздовж поверхні води відбувається «захват» води з подальшим її подрібненням. За результатами досліджень маємо розтікання води вздовж нижньої стінки ствола. Це дає підстави вважати, що процес розтікання води не призведе до погіршення якості розпилення води.

7. Обговорення результатів дослідження процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння

Проведені дослідження, що дозволили виявити особливості процесу заповнення водою ствола установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії. При цьому запропоновано математичну модель VOF-модель (модель об’єму рідини) для моделювання процесів нагнітання води у ствол установки з подальшим подрібненням води ударною хвилею, а також здійснено її обчислення за допомогою програмного середовища ANSYS. Отримані результати чисельного обчислення (рис. 2–7) на різний час, дають підстави вважати, що процес розтікання води не призведе до погіршення якості розпилення води та на подальше формування дрібнорозпиленого водяного струменя. Отримані результати демонструють порівняно високу інерцію у часі процесів вприскування води по відношенню до газодетонаційних процесів, що відбуваються в установці пожежогасіння періодично-імпульсної дії. Зокрема, інтервал часу між циклами детонації в установці пожежогасіння, що працює на частоті 23 Гц, складає близько 43,5 мс. Якщо відкинути цикл продувки, то маємо інтервал часу у 21 мс, за який необхідно вприснути воду у ствол.

За результатами наведених досліджень маємо, що тільки час розповсюдження цівки води з однієї до іншої сторони ствола складає 8 мс. До цього слід додати технічні обмеження у швидкодії електромагнітних клапанів. Наприклад, швидкодіючий клапан фірми Festo типу VZWD, має час відкриття у 20 мс та час закриття, що дорівнює 18 мс. Тобто, інерційність у часі цього клапану не відповідає потребам у забезпеченні імпульсного впорскування води у ствол установки. Таким чином, в установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії не є доцільним застосовувати імпульсне вприскування води у ствол на відміну від існуючих технічних засобів пожежогасіння «IFEX». Технічні засоби пожежогасіння «IFEX» не відповідають вимогам сучасності щодо продуктивності подачі, що визвано, насамперед, низкою періодичністю пострілу. Особливістю технології «IFEX» є те, що подача вогнегасної речовини відбувається не постійним потоком, а високошвидкісними імпульсними пострілами зі ствола, які приводяться в дію стисненим повітрям. Застосування газодетонаційної технології отримання дрібнорозпилених водяних струменів порівняно з імпульсною технологією дозволяє ефективніше здійснювати подрібнення рідини, а також дозволяє збільшувати інтенсивність подавання вогнегасної речовини для гасіння пожеж в залежності від класу та розвитку.

Проведені дослідження та отримані результати чисельних досліджень, щодо обґрунтування та узагальнення параметрів роботи установки пожежогасіння періодично-імпульсної дії, щодо впливу на формування дрібнорозпиленого водяного струменя, насамперед, є одним з початкових етапів послідового дослідження даної залежності. Повністю оцінити дану залежність можливо тільки при проведенні подальших досліджень в напрямку подрібнення цівки води у стволі установки пожежогасіння під дією ударної хвилі та процесу формування та подачі дрібнорозпилених водяних струменів в середину приміщень.

В подальшому є доцільним проведення експериментальних досліджень, щодо формування та подачі дрібнорозпиленого водяного струменя в середину приміщень під гасіння модельного осередку пожежі. Але під час практичного впровадження результатів дослідження можуть виникнути труднощі у зв’язку із не уніфікованою нормативно-правовою базою в Україні в сфері пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Але ці проблеми можуть бути вирішені шляхом застосування вимог та положень стандартів Європейського союзу та США.

8. Висновки

1. Обґрунтовано вибір математичної моделі у програмному середовищі ANSYS для моделювання процесів нагнітання води у ствол установки з подальшим подрібненням води ударною хвилею. Для моделювання процесів нагнітання води та подрібненням води у стволі застосовано VOF-модель (модель об’єму рідини), за якою проникнення одного середовища у інше відсутнє, та яка базується на методі відстеження поверхні, що застосовується до фіксованої ейлерової сітки.

2. Проведено чисельне дослідження технології гасіння пожежі дрібнорозпиленими водяними струменями шляхом дослідження процесу нагнітання води в стволі. За результатами чисельного дослідження процесу заповнення ствола водою виявлено, що порівняно високу інерцію у часі процесів впорскування води по відношенню до газодетонаційних процесів, що відбуваються у компресійно-детонаційній гарматі. Зокрема, інтервал часу між циклами детонації в установці, що працює на частоті 23 Гц, складає близько 43,5 мс. Якщо відкинути цикл продув-

ки, то маємо інтервал часу у 21 мс, за який необхідно вприснути воду до ствола установки пожежогасіння. За результатами наведених досліджень маємо, що тільки час розповсюдження цівки води з однієї до іншої сторони ствола складає 8 мс.

Література

1. Дубінін Д. П. Дослідження вимог до перспективних засобів пожежогасіння тонкорозпиленою водою. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2021. № 33. С. 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2

2. Liu Y., Wang X., Liu T., Ma J., Li G., Zhao Z. Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. Process Safety and Environmental Protection. 2020. 141. P. 344–354. doi: 10.1016/j.psep.2020.05.043

3. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Криворучко Є. М., Думчикова Д. М. Експериментальне дослідження методу гасіння пожежі водяним аерозолем у приміщеннях складної конфігурації. Проблеми пожежної безпеки. 2019. № 46. С. 47–53. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Dubinin.pdf

4. Dubinin D., Korytchenko K., Lisnyak A., Hrytsyna I., Trigub V. Improving the installation for fire extinguishing with finely-dispersed water. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 2/10(92). P. 8–43. doi: 10.15587/1729-4061.2018.127865

5. Korytchenko K., Sakun O., Dubinin D., Khilko Y., Slepuzhnikov E., Nikorchuk A., Tsebriuk I. Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gasdetonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. 3/5(93). P. 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

6. Rodriguez V., Jourdan G., Marty A., Allou A., Parisse J.-D. Planar shock wave sliding over a water layer. Experiments in Fluids. 2016. 57. P. 125. doi: 10.1007/s00348-016-2217-6

7. Stefanski K., Lewandowski D., Dygdala R., Kaczorowski M., Ingwer-Żabowska M., Smigielski G., Papliński, A. Explosive Formation and Spreading of Water-Spray Cloud – Experimental Development and Model Analyses. Central European Journal of Energetic Materials. 2009. 6. P. 291–302. URL: https://www.researchgate.net/publication/228375439.

8. Liu J.-Y., Liang D., Zhao Z., Dong W.-L. Progress in Research and Application of Electronic Ultrasonic Water Mist Fire Suppression Technology. Procedia Engineering. 2011. 11. P. 288–295. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.659

9. Xiang G., Wang, B. Numerical study of a planar shock interacting with a cylindrical water column embedded with an air cavity. Journal of Fluid Mechanics. 2017. 825. P. 825–852. doi: 10.1017/jfm.2017.403

10. Xu Y., Zhang, H. Interactions between a propagating detonation wave and circular water cloud in hydrogen/air mixture. Combustion and Flame. 2022. 245. P. 112369. doi: 10.48550/arXiv.2206.02312

11. ANSYS_Fluent_Theory_Guide. URL: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf.

12. Parham K., Esmaeilzadeh E., Atikol U., Aldabbagh L. B. Y. A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries. Heat Mass Transfer. 2011. 47. P. 427–437. doi: 10.1007/s00231-010-0741-0.

***D. Dubinin*[1]**, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
***K. Korytchenko*[2]**, *DSc, Senior Researcher, Head of Department*
***Y. Krivoruchko*[1]**, *Lecturer of the Department*
***S. Ragimov*[1]**, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*
***V. Trigub*[1]**, *PhD, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine*

FEATURES OF THE PROCESS OF WATER FILLING THE BARREL OF A PERIODIC-PULSE FIRE EXTINGUISHING INSTALLATION

In the work, research was carried out, which made it possible to reveal the peculiarities of the process of filling the barrel of the periodic-impulse fire extinguishing installation with water. At the same time, a mathematical model for simulating the processes of water injection into a pipe with subsequent crushing of water by a shock wave was substantiated and proposed. To simulate the processes of water injection and water crushing in the shaft of the installation, a VOF model (volume of liquid model) is used, according to which there is no penetration of one medium into another, and which is based on the surface tracking method applied to a fixed Euler grid. On the basis of the developed mathematical model in the ANSYS software environment, numerical studies of the process of filling the barrel of a periodic-impulse fire extinguishing installation with water were carried out. According to the results of a numerical study of the process of filling the barrel of the periodic-impulse fire extinguishing installation with water, a relatively high inertia in the time of the water injection processes in relation to the gas detonation processes occurring in the periodic-impulse fire extinguishing installation was revealed. In particular, the time interval between detonation cycles in the installation operating at a frequency of 23 Hz is about 43,5 ms. If we discard the purge cycle, then we have a time interval of 21 ms, during which it is necessary to inject water into the barrel of the intermittent-impulse fire extinguishing installation. According to the results of the above studies, we have that only the time for the spread of the stream of water from one side to the other side of the barrel of the periodic-impulse fire extinguishing installation is 8 ms. The conducted research makes it possible to investigate the influence of the parameters of the fire extinguishing installation on the formation of a finely sprayed water jet, and the obtained results will significantly increase the level of operational readiness of the personnel of fire and rescue units during operational actions to extinguish internal fires.

Keywords: fire extinguishing installation, finely sprayed water jets, mathematical model, numerical studies

References

1. Dubinin, D. (2021). Doslidzhennja vymog do perspektyvnyh zasobiv pozhezhogasinnja tonkorozpylenoju vodoju. Problemy nadzvychajnyh sytuacij, 33, 15–29. doi: 10.52363/2524-0226-2021-33-2

2. Liu, Y., Wang, X., Liu, T., Ma, J., Li, G., Zhao, Z. (2020). Preliminary study on extinguishing shielded fire with water mist. Process Safety and Environmental Protection, 141, 344–354. doi: 10.1016/j.psep.2020.05.043

3. Dubinin, D. P., Korytchenko, K. V., Kryvoruchko, Je. M., Dumchykova, D. M. (2019). Eksperymental'ne doslidzhennja metodu gasinnja pozhezhi vodjanym aerozolem u prymishhennjah skladnoi' konfiguracii'. Problemy pozhezhnoi' bezpeky, 46, 47–53. Available at: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb46/Dubinin.pdf

4. 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), 8–43. doi:10.15587/1729-4061.2018.127865

5. Korytchenko, K., Sakun, O., Dubinin, D., Khilko, Y., Slepuzhnikov, E., Nikorchuk, A., Tsebriuk, I. (2018). Experimental investigation of the fire-extinguishing

system with a gasdetonation charge for fluid acceleration. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/5(93), 47–54. doi: 10.15587/1729-4061.2018.134193

6. Rodriguez, V., Jourdan, G., Marty, A., Allou, A., Parisse, J.-D. (2016). Planar shock wave sliding over a water layer. Experiments in Fluids, 57, 125. doi: 10.1007/s00348-016-2217-6

7. Stefanski, K., Lewandowski, D., Dygdala, R., Kaczorowski, M., Ingwer-Żabowska, M., Smigielski, G., Papliński, A. (2009). Explosive Formation and Spreading of Water-Spray Cloud – Experimental Development and Model Analyses. Central European Journal of Energetic Materials, 2009, 6, 291–302. Available at: https://www.researchgate.net/publication/228375439

8. Liu, J.-Y., Liang, D., Zhao, Z., Dong, W.-L. (2011). Progress in Research and Application of Electronic Ultrasonic Water Mist Fire Suppression Technology. Procedia Engineering, 11, 288–295. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.659

9. Xiang, G., Wang, B. (2017). Numerical study of a planar shock interacting with a cylindrical water column embedded with an air cavity. Journal of Fluid Mechanics, 825, 825–852. doi: 10.1017/jfm.2017.403

10. Xu, Y., Zhang, H. (2022). Interactions between a propagating detonation wave and circular water cloud in hydrogen/air mixture. Combustion and Flame, 245, 112369. doi: 10.48550/arXiv.2206.02312

11. ANSYS_Fluent_Theory_Guide. Available at: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf

12. Parham, K., Esmaeilzadeh, E., Atikol, U., Aldabbagh, L. B. Y. (2011). A numerical study of turbulent opposed impinging jets issuing from triangular nozzles with different geometries. Heat Mass Transfer, 47, 427–437. doi: 10.1007/s00231-010-0741-0

Надійшла до редколегії: 25.09.2023
Прийнята до друку: 07.11.2023

УДК 313.86

***Д. Ю. Белюченко*[1]**, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-7782-2019)*
***А. В. Максимов*[2]**, *викл. (ORCID 0000-0001-7015-090X)*
***В. М. Стрілець*[1]**, *д.т.н., професор, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-5992-1195)*
***О. А. Бурменко*[1]**, *к.т.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-5014-2678)*
[1]Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна
[2]Міжрегіональний центр гуманітарного розмінування та швидкого реагування Державної служби України з надзвичайних ситуацій

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА РІЗНИХ ВАРІАНТІВ ПРОВЕДЕННЯ ВИСОТНО-РЯТУВАЛЬНИХ РОБІТ

Здійснено кількісну порівняльну оцінку впливу чисельності складу рятувальних груп, а також рівня підготовленості рятувальників-верхолазів на час здійснення різних варіантів рятування потерпілого шляхом евакуації в безопорному просторі, що сприятиме розв'язанню проблеми скорочення часу проведення рятувальних робіт на висоті без зниження рівня безпеки як особового складу рятувальних груп, так і потерпілих, які вимагають евакуацію в безопорному просторі. Доведено, що загальноприйняті варіанти використання рятувальниками-верхолазами існуючого спеціального оснащення та страхувальних засобів суттєво впливають на ефективність відповідної оперативної діяльності, яка полягає в проведенні експериментальних досліджень щодо рятування потерпілого з висоти 15 м, що відповідає рятуванню з четвертого поверху уподовж зовнішньої стіни багатоповерхової будівлі за допомогою як щита спинального іммобілізаційного, так і нош рятувальних особовим складом рятувальників базового та початкового рівня підготовки групами повного та неповного складу у відповідності до критеріїв Шапіро-Уілкі, Фішера та Стьюдента. Показано, що розподіл часу здійснення висотно-рятувальних робіт за розглянутими варіантами з рівнем значимості α=0,05 можна вважати нормальним. При цьому математичне очікування часу висотно-рятувальних робіт на висоті для визначених варіантів значно відрізняється не тільки в залежності від технічних можливостей спеціального оснащення та страхувальних засобів, які використовуються, але й від рівня підготовленості рятувальника-верхолаза та чисельності рятувальної групи. Ці властивості необхідно враховувати під час складання методичних рекомендацій з виконання рятувальних робіт на висоті, а також професійної підготовки рятувальника-верхолаза. Шляхом порівняння з результатами досліджень, що проводились у 2018–2019 роках, підтверджено достовірність отриманих оцінок.

Ключові слова: спеціальне оснащення, страхувальні засоби, висотно-рятувальні роботи, рятувальник-верхолаз

1. Вступ

Рятувальні роботи на висотних об'єктах житлового та промислового призначення виконуються у випадках руйнування об'єктів, викликаних військовими діями, землетрусами, вибухами, пожежами, саморуйнуванням тощо. Поки що рятування людей з висотних об'єктів представляє велику проблему і вирішується особовим складом підрозділів оперативно-рятувальної служби ДСНС, які у свою чергу, мають труднощі з комплектуванням спеціального оснащення та страхувальних засобів та рятувальними пристроями як групового, так і індивідуального призначення. Теперішній час вимагає від підрозділів оперативно-рятувальної служби найбільш ефективно проводити невідкладні роботи на висоті з деблокування та порятунку людей, розбору завалів основних будівельних конструкцій.

Все це свідчить, що проблема скорочення часу проведення рятувальних робіт на висоті без зниження рівня безпеки як особового складу рятувальних груп, так і потерпілих, які вимагають евакуацію в безопорному просторі, є край актуальною.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Зважаючи на те, що в останні роки ведеться активна спрямованість на модерні-

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

зацію містобудування в галузі планування та будівництва об'єктів підвищеної поверховості, виникає велика проблема в організації та проведення висотно-рятувальних робіт підрозділами оперативно-рятувальної служби на цих об'єктах у разі виникнення надзвичайних ситуацій [1].

В [2] визначено, що в провідних країнах світу на озброєнні рятувальних підрозділів з'явилося множинне різноманіття професійного верхолазного спорядження для групового та індивідуального порятунку людей, а також спеціальне оснащення та страхувальні засоби, які дозволяють провести порятунок людей в умовах надзвичайної ситуації. Завдяки новітнім технологіям та використанню високотехнологічних матеріалів, збільшилася ефективність та надійність нового спорядження для рятувальних робіт, а також підвищилася безпека при його використанні.

Результати дослідження, які наведені в [3] свідчать, що у період 2008–2018 рр. нові види верхолазного спорядження були адаптовані та застосовані до завдань рятувальників з метою підвищення ефективності ведення висотно-рятувальних робіт на об'єктах підвищеної поверховості. Нове професійне спорядження [4] дає значну перевагу можливості використання окремих нових способів проведення висотно-рятувальних робіт, фактично в будь-якому місці з невеликою кількістю рятувальників на промислових об'єктах та цивільних висотних будівлях. Треба зазначити, що питання які би визначали кількість необхідного особового складу та спеціального оснащення та страхувальних засобів, не розглядалися.

В той же час, в [5] відмічено, що головною вимогою проведення рятувальних робіт на висоті є достатня кваліфікація рятувальників, а також надійність та функціональність необхідного індивідуального та колективного верхолазного спорядження. В [6] були досліджені типові операції проведення рятувальних робіт на висоті, де було встановлено що з появою та використанням нового рятувального спорядження, з'явилося багато варіантів ведення рятувальних робіт на об'єктах підвищеної поверховості. У більшості випадків, способи ведення даних робіт побудовані на багаторічній практиці рятувальних робіт з висоти та прив'язані до технічних характеристик спорядження. Встановлено, що питання які би висвітлювали ефективність проведення рятувальних робот на висоті особовим складом оперативно-рятувального підрозділу, не розглядалися.

Результати статистики [7] показує, що найпоширеніша причина, нещасних випадків під час проведення рятувальних робіт з висоти у рятувальників є порушення встановлених правил техніки безпеки 62 %, другою причиною є слабка професійна підготовка рятувальників 22 %, третя за кількістю травмованих причина – вплив інших факторів 16 %. В той же час, в [8] визначено, що існує проблема в галузі навчально-матеріальної бази підготовки рятувальників до проведення робіт з порятунку людей на висоті, як у самому навчанні так і в оснащенні різними спеціалізованими тренажерами з відпрацювання отриманих теоретичних знань та практичних навичок. Через не доведення до якісних показників даної бази неможливо повністю бути впевненим у професіоналізмі рятувальників, оскільки більшість поставлених завдань під час відпрацювання необхідних навичок та майстерності рятувальника мають випереджальний характер підготовки з використанням наявного верхолазного спорядження та впровадження нових технічних засобів та методик проведення рятувальних робіт на висоті.

В [9] підкреслюється, що впровадження сучасних методик та прийомів, які будуть закріплювати практичні навичками та вміннями, які здобуті під час практичного відпрацювання вправ на спеціалізованих тренажерах з моделюванням

надзвичайних ситуацій на висоті різної складності. Таким чином це допоможе підвищити рівень та якість виконання рятувальних робіт з порятунку людей на висоті, бути морально та психологічно підготовленими для ведення рятувальних та інших невідкладних робіт, як самостійно так і у складі висотно-рятувальної групи.

Крім цього в [10] були досліджені операції проведення рятувальником робіт на висоті, які вимагають високу професійну підготовленість, оскільки одна помилка може призвести до нещасного випадку з рятувальником і з тим, кому він надає допомогу. З урахуванням цього в [11] зазначено, що навчання верхолаза-рятувальника займає від кількох місяців до 3 років, залежно від їх приналежності та умов конкретним можливостями відповідного підрозділу або кожної общини чи міста, що обслуговується. Навчання складається зазвичай з декількох блоків, до яких можуть належати: перша долікарська допомога, робота на висоті на завалах, рятувальні роботи на висоті в літню та зимову пору року, повітряний порятунок з вертольота, робота в нічний час доби. Вивчення кожного із цих блоків завершується іспитом. Кожен з навчальних блоків включає в себе цілий ряд окремих дисциплін. Проте, реальна практика проведення висотно-рятувальних робіт показує, що досить часто вони виконуються розрахунками неповної чисельності [12].

Всі ці чинники, які впливають на ефективність проведення рятувальних робіт на висоті наведено без застосування кількісних показників, яких не було отримано.

В Україні, як і в інших провідних країнах світу, є актуальним питання, підвищенням ефективності проведення рятувальних робіт на висоті. При цьому нормативні вимоги до рівня підготовленості особового складу оперативно-рятувального підрозділу, які будуть проводити вправи з рятувальних робіт на висоті конкретизовані тільки для індивідуальних вправ (спуск, підйом рятувальника, одягання індивідуальних страхованих систем, в'язання спеціальних вузлів тощо) [13]. Спроба зробити це була в [14], але там це було зроблено тільки для рятувальників-висотників базового рівня підготовки, які стосувались тільки рятуванню потерпілого без тями за допомогою нош пожежних вогнезахисних. Тобто, не є відомим, чи вимагають доопрацювання існуючі рекомендації по відношенню до вправ з порятунку людей з висоти у складі відділення з використанням з колективного та індивідуального спеціального оснащення та страхувальних засобів.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність даних щодо впливу чисельності складу рятувальних груп, а також рівня підготовленості рятувальників-верхолазів на час здійснення різних варіантів рятування потерпілого шляхом евакуації в безопорному просторі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є кількісна порівняльна оцінка впливу чисельності складу рятувальних груп, а також рівня підготовленості рятувальників-верхолазів на час здійснення різних варіантів рятування потерпілого шляхом евакуації в безопорному просторі.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

1. Обґрунтувати порядок проведення експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів з урахуванням використання групою рятувальників-верхолазів різного рівня підготовки двох загальноприйнятих варіантів використання спеціального та допоміжного оснащення і обладнання з подальшою статистичною оцінкою експериментальних результатів у відповідності до критеріїв Шапіро-Уілкі, Фішера та Стьюдента.

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

2. Здійснити статистичний порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження різних варіантів проведення висотно-рятувальних робіт з порятунку постраждалого в умовах повного та скороченого складу груп рятувальників-верхолазів з базовим та початковим рівнем підготовки.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – висотно-рятувальні роботи з порятунку постраждалого. Предмет дослідження – порівняльний аналіз порятунку постраждалого в ношах рятувальних вогнезахисних та щита спинального іммобілізаційного рятувальниками-верхолазами з висоти.

Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що рівень підготовки рятувальників-верхолазів та чисельність складу рятувальної групи, а також загальноприйняті варіанти використання ними існуючого спеціального оснащення та страхувальних засобів суттєво впливають на ефективність оперативної діяльності рятувальників-верхолазів оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС.

Метод дослідження – фіксація за допомогою повіреного секундоміру марки Casio HS-80TW-1EF часу виконання контрольної вправи рятувальниками-верхолазами різного рівня підготовки з урахуваннями спеціального оснащення та страхувальних засобів з подальшою статистичною оцінкою на ЕОМ в середовищі Excel експериментальних результатів у відповідності до критеріїв Шапіро-Уілкі, Фішера та Стьюдента.

Реалізацію поставленого завдання здійснювали випробовувані з числа рятувальників Міжрегіонального центру гуманітарного розмінування та швидкого реагування Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національного університету цивільного захисту України. Вони виконували висотно-рятувальні роботи з порятунку постраждалого з висоти 15 метрів, використовуючи ноші рятувальні вогнезахисні (ВРР1) та щит спинальний іммобілізаційний (ВРР2), як у повному складі рятувальних груп, так і в умовах скорочення чисельності складу рятувальників-верхолазів з базовим та початковим рівнями підготовки.

5. Обґрунтування порядку проведення експериментальних досліджень та обробки отриманих результатів

5.1. Порядок проведення експериментальних досліджень

Реалізація запропонованого підходу до порівняльного аналізу закономірностей виконання типових операцій при проведені висотно-рятувальних робіт, групою рятувальників-верхолазів здійснюється шляхом порівняння часу реалізації способу порятунку постраждалого з висоти, за чотирма різними варіантами використання спеціального та допоміжного оснащення та обладнання:

варіант 1 – порятунок постраждалого з висоти, використовуючи ноші рятувальні вогнезахисні в умовах повного складу групи рятувальників-верхолазів з базовим рівням підготовки;

варіант 2 – порятунок постраждалого з висоти, використовуючи щит спинальний іммобілізаційний в умовах повного складу групи рятувальників-верхолазів з початковим рівням підготовки;

варіант 3 – порятунок постраждалого з висоти, використовуючи ноші рятувальні вогнезахисні в умовах скорочення чисельності складу групи рятувальників-верхолазів з базовим рівням підготовки;

варіант 4 – порятунок постраждалого з висоти, використовуючи щит спиналь-

ний іммобілізаційний в умовах скорочення чисельності складу групи рятувальників-верхолазів з початковим рівням підготовки.

Контрольні вправи проводили випробувані з числа здобувачів вищої освіти 3-го курсу Національного університету цивільного захисту України на базі Черкаського інституту ім. Героїв Чорнобиля з початковим рівнем висотної підготовки, та рятувальники які проходять перепідготовку в Міжрегіонального центру гуманітарного розмінування та швидкого реагування Державної служби України з надзвичайних ситуацій та набули базовий рівень висотної підготовки.

Порятунок постраждалого з висоти проводився як у повному складі рятувальної групи з 5 осіб, так і у зменшеній чисельності складу з 4 осіб. Він може бути «активним» або «пасивним». При активному способі рятувальник спускається разом з потерпілим і повністю контролює рух. Спуск одного потерпілого (без рятувальника) називається пасивним. При цьому його рух контролює група рятувальників як у вихідній точці, так і в точці прийому потерпілого. Другий спосіб вважається більш надійним, швидким та безпечним, але потребує більшої кількості рятувальників.

Вибір та переваги «пасивного» способу порятунку з висоти пояснюється тим, що постраждалого можна евакуювати відносно швидко, безпечно і практично з будь-якої висоти (в залежності від довжини мотузки).

В цьому випадку послідовність дій рятувальної групи при ВРР1 має наступний вигляд:

- визначити обов’язки кожного рятувальника-верхолаза та його початкову позицію;
- покласти постраждалого в ноші-рятувальні вогнезахисні;
- зафіксувати постраждалого спеціальними ременями для можливості транспортування;
- вибрати основну опору для кріплення рятувальної мотузки;
- визначити допоміжну опору для кріплення страховки;
- вибір, фіксування та заправлення основної мотузки до гальмівного пристрою;
- кінці канатів закріплюються до НРВ;
- НРВ забезпечуються окремою мотузкою для верхньої страховки та страхувальним (гальмівним) пристроєм;
- спуск контролює група рятувальників-верхолазів як у вихідній точці, так і в точці прийому потерпілого.

Дії рятувальної групи при проведенні ВРР2 виконуються в наступній послідовності:

- визначити обов’язки кожного учаснику рятувальної групи;
- покласти постраждалого на щита спинальний іммобілізаційний;
- визначити основну та допоміжну опору для закріплення основної та страхувальної мотузки;
- зафіксувати лямки для закріплення потерпілого за допомогою пряжок у відповідні петлі (для усунення зісковзування ременів);
- надати ЩСІ горизонтального положення шляхом регулювання довжини кожної петлі;
- прикріпити отримані петлі ЩСІ до основної мотузки;
- забезпечується верхня страховка за допомогою рятувальної мотузки через гальмівний пристрій який закріплений до допоміжної опори за допомогою петлі.

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

- приєднується гальмівний пристрій до основної конструкції вправляється основна рятувальна мотузка, закріплюємо до ЩСІ, контролюємо швидкість спуску до точки прийому.

Варто зазначити, що у рятувальних групах у повному складі заздалегідь чітко визначений послідовний алгоритм дій кожного рятувальника-верхолаза, розподілена послідовність необхідних елементів та етапів, де відпрацьована взаємодія та враховуються індивідуальні можливості кожного рятувальника-верхолаза для розподілу обов'язків залежно від їх фізичної підготовленості і професійних навиків.

Під час проведення висотно-рятувальних робіт з порятунку постраждалого в умовах зменшеної чисельності рятувальної групи, збільшується кількість випадків неузгодженості у взаємодії; несвоєчасного виконання окремих елементів ВРР, яке виникає через необхідність перерозподілу загального навантаження рятувальної групи на кожного рятувальника-верхолаза, що збільшує час проведення порятунку потерпілого з висоти.

5.2. Статистична обробка експериментальних результатів

Статистична обробка отриманих результатів починається з перевірки отриманих вибірок на нормальність їх розподілу. З урахуванням того, що була можливість провести по двадцять випробувань за кожним варіантом рятування, перевірку на нормальність доцільно виконати за критерієм Шапіро-Уілкі [14]. Для цього необхідно розрахувати математичне очікування виконання кожної вправи висотно-рятувальних робіт (ВРР) розрахунками повної та неповної чисельності:

$$\bar{t}(\text{ВРР}) = \frac{\sum_{i}^{n} t_i}{n}, \tag{1}$$

де t_i – час і-го виконання обраного для розгляду варіанту ВРР, с;

середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma(\text{ВРР}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(t_i - \bar{t}_1\right)^2}, \qquad [\text{с}], \tag{2}$$

та

$$n \cdot m_2(\text{ВРР}) = \sum_{i=1}^{n} \left(t_i - \bar{t}\ \right)^2, \qquad [\text{с}^2], \tag{3}$$

де m_2 – вибірковий центральний момент другого порядку,

а також проміжну суму:

$$S(\text{ВРР}) = \sum_{i}^{k} a_{n-i+1} \cdot (t_{(n-i+1)} - t_i) \qquad [\text{с}], \tag{4}$$

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 [14]).

Розподіл вважається нормальним, якщо у відповідності до табл. 11 [14] для рівня значимості α=0,05 та n=20:

$$W(\text{ВРР}) = \frac{S^2(\text{ВРР})}{n \cdot m_2(\text{ВРР})} \geq W_{\text{табл}} = 0{,}905, \tag{5}$$

розподіл у відповідності до [14] вважається нормальним.

Якщо вибірки є нормальними, то це дозволяє перевірити у відповідності до критерію Стьюдента те, наскільки значимо відрізняються середні значення виконання ВРР за різними варіантами.

Для цього необхідно розглянути гіпотезу:

$$H_0 : \ \bar{t}_{v1} = \bar{t}_{v2} \tag{6}$$

та її альтернатива:

$$H_1 : \ \bar{t}_{v1} \neq \bar{t}_{v2}, \tag{7}$$

яка доводить відмінність середніх значень.

Вибір конкретної методики розрахунку t-критерію [15] вибирається з урахуванням рівності дисперсій. Якщо у відповідності до (5) розподіли можна вважати нормальними, то вибір конкретної методики розрахунку t-критерію вибирається з урахуванням рівності дисперсій:

$$H_0 : \ \sigma_{v1}^2 = \sigma_{v2}^2 \tag{8}$$

за F-критерієм:

$$F = \sigma_1^2 \Big/ \sigma_2^2, \tag{9}$$

де σ_1^2 – більша з оцінок дисперсій в двох вибірках.

При цьому критичне значення $F_{\text{кр}}$ при рівні значимості α=0,05 та числі ступенів свободи:

$$\upsilon_{v1} = n_{v1} - 1 = 19; \ \upsilon_2 = n_{v2} - 1 = 19, \tag{10}$$

де $n_{v1} = n_{v2} = 20$ – кількість вправ, які виконувались під час проведення експериментів за кожним із обраних варіантів виконання контрольної вправи виконання ВРР, дорівнює [16]:

$$F_{\text{кр}} = F_{\text{табл}} = 2{,}15. \tag{11}$$

У випадку:

$$F \leq F_{\text{кр}}, \tag{12}$$

гіпотеза (8) вважається вірною.

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

В цьому випадку, з урахуванням того, що стандартна помилка різності:

$$S_{v1-v2} = \sqrt{\frac{(n_{v1}-1)\cdot\sigma_{v1}^2 + (n_{v2}-1)\cdot\sigma_{v2}^2}{n_{v1}+n_{v2}-2}\cdot\left(\frac{1}{n_{v1}}+\frac{1}{n_{2v}}\right)}; \quad (13)$$

а число ступенів свободи:

$$\upsilon = n_{л}(п) + n_{л}(к) - 2 = 38, \quad (14)$$

$$t_{v1-v2} = \frac{|\bar{t}_{v1} - \bar{t}_{v2}|}{S_{v1-v2}}. \quad (15)$$

Гіпотеза (7) приймається, якщо:

$$t_{набл\,(v1-v2)} \geq t_{табл}(\alpha = 0{,}05;\ \upsilon = 38) = 2{,}15. \quad (16)$$

Тобто, можна стверджувати, що при рівні значимості α=0,05 результати часу виконання обраних для розгляду варіантів проведення висотно-рятувальних робіт відрізняються суттєво.

Таким чином, обґрунтовано порядок проведення порівняльного аналізу різних варіантів здійснення висотно-рятувальних робіт з урахуванням як рівня підготовленості рятувальників-висотників, так і повноти складу рятувального підрозділу полягає в проведенні експериментальних досліджень щодо рятування потерпілого з висоти 15 м, що відповідає рятуванню з четвертого поверху, уподовж зовнішньої стіни багатоповерхової будівлі за допомогою як щита спинального іммобілізаційного, так і нош рятувальних особовим складом рятувальників базового та початкового рівня підготовки групами повного та неповного складу з подальшою статистичною оцінкою отриманих експериментальних результатів у відповідності до критеріїв Шапіро-Уілкі, Фішера та Стьюдента.

6. Статистичний порівняльний аналіз різних варіантів рятування постраждалого на висоті

У відповідності до 5.2 отримані експериментальні результати (табл. 1) висотно-рятувальних робіт рятування потерпілого за допомогою щита спинального іммобілізаційного (ВРР 1) та нош рятувальних вогнезахисних (ВРР 2) спочатку були перевірені на нормальність розподілу згідно до (1–5). В узагальненому вигляді отримані показники наведені в табл. 2 та табл. 3.

Застосовані наступні скорочення: ВРР 1 – висотно-рятувальні роботи із застосуванням щита спинального іммобілізаційного; ВРР 2 – висотно-рятувальні роботи із застосуванням нош рятувальних вогнезахисних; ПС – повний склад рятувального розрахунку; НС – неповний склад рятувального розрахунку; БР – базовий рівень підготовки рятувальників-верхолазів; ПР – початковий рівень підготовки рятувальників-верхолазів.

Табл. 1. Експериментальні результати (час рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою щита спинального іммобілізаційного та нош рятувальних вогнезахисних, с)

ВРР 1				ВВР 2			
ПС		НС		ПС		НС	
БР	ПР	БР	ПР	БР	ПР	БР	ПР
593	663	494	670	386	419	513	557
538	735	694	691	422	403	360	598
703	770	603	669	343	380	438	482
680	665	694	831	474	418	500	368
738	720	611	515	371	501	323	499
573	746	683	608	316	466	514	525
511	557	648	815	334	562	560	383
532	656	692	897	479	435	506	540
590	619	598	776	322	487	378	413
586	629	714	781	369	265	509	405
676	700	567	749	330	623	485	510
521	706	611	734	297	371	399	472
708	709	653	813	290	405	322	529
609	542	772	694	379	411	506	563
595	677	709	791	395	476	469	581
471	764	783	824	478	439	296	426
665	521	700	827	313	449	419	509
650	698	656	834	312	467	456	520
671	825	728	685	356	438	449	488
501	676	769	706	381	529	511	512

Табл. 2. Результати перевірки експериментальних результатів висотно-рятувальних робіт з рятування потерпілого за допомогою щита спинального іммобілізаційного

	ПС		НС	
	БР	ПР	БР	ПР
$\bar{t}(\text{ВРР1})$, с	605,55	678,90	668,95	745,50
$\sigma(\text{ВРР1})$, с	77,76	77,55	73,15	91,51
$\sigma^2(\text{ВРР1})$, $с^2$	6047,10	6014,20	5350,89	8374,89
$nm_2(\text{ВРР1})$, $с^2$	114894,95	114269,80	101666,95	159123,00
S (ВРР1), $с^2$	110728,29	108202,91	96859,32	151243,91
W (ВРР1)	0,964	0,947	0,953	0,950
$W_{табл}$	0,905			

Табл. 3. Результати перевірки експериментальних результатів висотно-рятувальних робіт з рятування потерпілого за допомогою нош рятувальних вогнезахисних

	ПС		НС	
	БР	ПР	БР	ПР
$\bar{t}(\text{ВРР2})$, с	367,35	447,20	445,65	494,00
$\sigma(\text{ВРР2})$, с	58,67	75,16	76,30	65,25
$\sigma^2(\text{ВРР2})$, $с^2$	3441,71	5649,75	5821,19	4257,37
$nm_2(\text{ВРР2})$, $с^2$	65392,55	107345,20	110602,55	80890,00
S (ВРР2), $с^2$	59231,29	99636,25	101969,35	75476,46
W (ВРР2)	0,906	0,928	0,922	0,933
$W_{табл}$	0,905			

Результати статистичного аналізу, які наведено в табл. 2 та табл. 3, отриманих експериментальних результатів дозволяє стверджувати, що їх розподіли з рівнем

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

значимості α=0,05 можна вважати нормальними (рис. 1, рис. 2). Це дозволяє перейти до перевірки того, наскільки значимо відрізняються математичні очікування часу рятування з висоти потерпілого за різними варіантами проведення висотно-рятувальних робіт за критерієм Стьюдента.

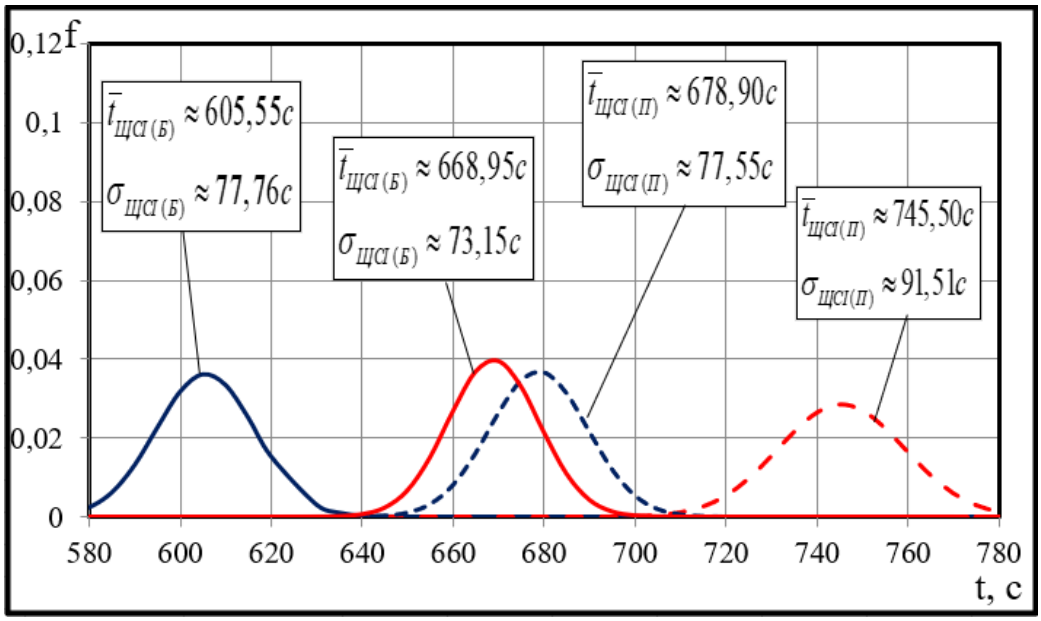


Рис. 1. Розподіл часу виконання висотно-рятувальних робіт (ВРР1) з використанням щита спинального іммобілізаційного в залежності від кількості складу рятувальної групи (синій колір – повний склад відділення, червоний – неповний склад відділення) та рівня підготовленості рятувальників-верхолазів (суцільна лінія – базовий рівень підготовки, пунктирна – початковий рівень підготовки)

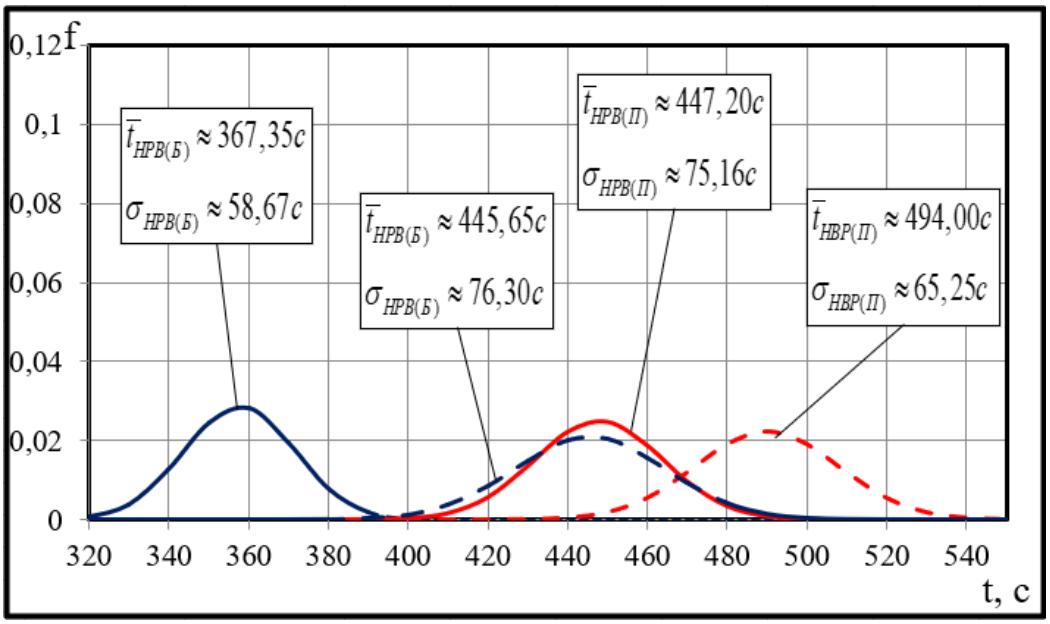


Рис. 2. Розподіл часу виконання висотно-рятувальних робіт (ВВР2) з використанням нош рятувальних вогнезахисних в залежності від кількості складу рятувальної групи (синій колір – повний склад відділення, червоний – неповний склад відділення) та рівня підготовленості рятувальників-верхолазів (суцільна лінія – базовий рівень підготовки, пунктирна – початковий рівень підготовки)

Перевірка рівності дисперсій у відповідності до (6–11), результати якої наведені в табл. 4, дозволяють стверджувати, що дисперсії розподілів обраних для

порівняння варіантів проведення висотно-рятувальних робіт з рівнем значимості α=0,05 можуть вважатись рівними. Крім цього, одночасно була перевірена рівність дисперсій експериментальних результатів рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою нош пожежних рятувальних розрахунком базового рівня підготовленості у повному складі, які були отримані як в серії, яка наведена в табл. 1, так і в серії аналогічного дослідження, яке проводилось у 2018–2019 р.р. [13]. Видно, що і в цьому випадку дисперсії з рівнем значимості α = 0,05 можна вважати рівними.

Табл. 4. Результати перевірки рівності дисперсій обраних для порівняння варіантів проведення висотно-рятувальних робіт

	ВРР 1			ВРР 2			ВРР1 ПС БР – ВРР2 НС ПР	ВРР2 ПС БР – ВРР2 ПС БР [14]
	ПС БР-ПР	НС БР-ПР	ПС ПР - НС БР	ПС БР-ПР	НС БР-ПР	ПС ПР - НС БР		
1	2	3	4	5	6	7	8	8
F	1,01	1,57	1,12	1,04	1,31	1,63	1,42	1,14
$F_{табл}$	2,15							

Отримані результати, які наведені в табл. 4, дозволяють перейти до перевірки відмінності середніх значень за критерієм Стьюдента у відповідності до (13–16). В узагальненому вигляді вони наведені в табл. 5.

Табл. 5. Результати перевірки відмінності середніх значень обраних для порівняння варіантів проведення висотно-рятувальних робіт

	ВРР 1			ВРР 2			ВРР1 ПС БР – ВРР2 НС ПР	ВРР2 ПС БР – ВРР2 ПС БР [14]
	ПС БР-ПР	НС БР-ПР	ПС ПР - НС БР	ПС БР-ПР	НС БР-ПР	ПС ПР - НС БР		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_{v1-v2}	24,56	26,20	23,84	18,71	22,45	23,94	22,70	23,02
υ	38	38	38	38	38	38	38	38
t_{v1-v2}	2,97	2,92	0,42	3,46	2,15	0,07	4,91	0,63
$t_{табл}$	2,04							

Видно (табл. 5), що з рівнем значимості α=0,05 можна стверджувати, що під час висотно-рятувальних робіт фактори, які пов'язані з кількістю складу рятувальної групи рятувальників-верхолазів та їх рівнем професійної підготовки, суттєво впливають на час проведення рятувальних робіт. Крім цього, практично співпали результати рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою нош рятувальних вогнезахисних, які були отримані розрахунками повної чисельності та базового рівня підготовленості на макетах багатоповерхових будівель в різних регіонах України.

Таким чином, статистичний порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження різних варіантів проведення висотно-рятувальних робіт з порятунку постраждалого показав, що всі вони описуються нормальним розподілом незалежно від варіанта рятування потерпілого, рівня підготовленості особового складу та їх кількості в оперативному розрахунку рятувальної групи. При цьому всі ці фактори суттєво впливають на час проведення рятувальних робіт.

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

7. Обговорення результатів порівняльної оцінки різних варіантів проведення висотно-рятувальних робіт

Проведений аналіз показав, що важливою та нерозв'язаною частиною проблеми готовності оперативно-рятувальної служби ДСНС є підвищення ефективності оперативної роботи груп рятувальників-верхолазів під час рятувальних робіт на висоті, з використанням необхідного спеціального оснащення та страхувальних засобів, допоміжного спеціального обладнання та аварійно-рятувальних інструментів.

Гіпотеза дослідження стосовно того, що рівень підготовки рятувальників-верхолазів та чисельність складу рятувальної групи, а також загальноприйняті варіанти використання ними існуючого спеціального оснащення та страхувальних засобів суттєво впливають на ефективність відповідної оперативної діяльності, а саме це було відмінністю проведеного дослідження у порівнянні з тим, в якому 2018–2019 роках розглядався тільки варіант рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою нош рятувальних вогнезахисних розрахунками повної чисельності та базового рівня підготовленості на макетах багатоповерхових будівель, отримала своє підтвердження. Це пояснюється тим, що всі основні висновки дослідження зроблені з рівнем значимості α=0,05. Так, оскільки всі отримані за результатами експериментальних досліджень (табл. 1) розподіли часу виконання висотно-рятувальних робіт є нормальними (рис. 1, рис. 2), свідченням чого є те, що критерій Шапіро-Уілкі всіх розглянутих випадках (табл. 2, табл. 3) був більшим його табличного значення, яке було визначене з рівнем значимості α=0,05, перевірка їх відмінності виконувалась за допомогою критерію Стьюдента. Вибір конкретної методики оцінювання t-критерію було здійснено з урахуванням того, що дисперсії розподілів обраних для порівняння типових варіантів проведення висотно-рятувальних робіт у відповідності до критерію Кохрена з рівнем значимості α=0,05 (табл. 4) можуть вважатись рівними. Це ж стосується і порівняння експериментальних результатів рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою нош пожежних рятувальних розрахунком базового рівня підготовленості у повному складі (стовпчик 8 табл. 4) з аналогічними, які були отримані у 2018–2019 роках (стовпчик 9 табл. 4).

Перевірка відмінностей середніх значень часу проведення висотно-верхолазних робіт між обраними варіантами за обраною методикою застосування критерію Стьюдента показала суттєві розбіжності між ними, свідченням чого є те, що розраховані показники t_{v1-v2} є більшими (табл. 5), ніж відповідне табличне значення $t_{табл}$, яке було визначене з рівнем значимості α=0,05. Це свідчить про наступне: фактори, які пов'язані з кількістю складу рятувальної групи рятувальників-верхолазів та їх рівнем професійної підготовки, суттєво впливають на час проведення висотно-рятувальних α=0,05) робіт.

При цьому фактично співпадають експериментальні результати рятування потерпілого за допомогою нош пожежних рятувальних розрахунком базового рівня підготовленості у повному складі з аналогічними, які були отримані у 2018–2019 роках (стовпчики 8 та 9 табл. 5). З урахуванням співпадання їх дисперсій (стовпчики 8 та 9 табл. 4) це свідчить про їх достовірність і дозволяє користуватись ними як для проведення відповідного імітаційного моделювання діяльності рятувальників-верхолазів, так і для обґрунтування відповідних практичних рекомендацій.

Так, співпадання з рівнем значимості α=0,05 часу проведення висотно-верхолазних робіт рятувальниками початкового рівня підготовленості, що пра-

цюють в розрахунках повного складу, з відповідним часом проведення висотно-верхолазних робіт рятувальниками базового рівня підготовленості, що працюють в розрахунках неповного складу, як у випадку застосування щита спинального іммобілізаційного (стовпчик 4 табл. 5), так і випадку застосування нош рятувальних вогнезахисних (стовпчик 7 табл. 5), свідчить про доцільність рятування з висоти потерпілих розрахунками неповного складу тільки у випадках, коли рятувальники-висотники мають базовий рівень підготовленості. Тобто, математичне очікування часу висотно-рятувальних робіт з порятунку потерпілого для однотипних варіантів з використанням нош рятувальних вогнезахисних та щита спинального іммобілізаційного суттєво відрізняється насамперед в залежності від кількості складу групи рятувальників-верхолазів, від кваліфікації рятувальника-верхолаза з базовим та початковим рівнем підготовки.

Отримані результати пояснюються тим, що зменшення складу групи призводить до збільшення кількості необхідних операцій та дій, які приходяться на кожного рятувальника-верхолаза. В результаті збільшується загальне навантаження у порівнянні зі стандартною процедурою, коли кожний етап рятувальних робіт виконується у чітко визначеною процедурою. Тобто, на початковому етапі підготовки рятувальника-верхолаза для досягнення максимально ефективних результатів проведення висотно-рятувальних робіт з порятунку потерпілого необхідно розробляти чіткі, зрозумілі та послідовні алгоритми дій як для повного складу рятувальної групи, так і для зменшеної її кількості. При цьому повинні бути визначені додаткові етапи та елементи дій кожного рятувальника-верхолаза, а також розглянуті можливості використання новітнього спеціалізованого оснащення та обладнання, допоміжних засобів, особливостей проведення відповідних навчань та тренувань. Все це свідчить, що визначені властивості необхідно враховувати під час складання методичних рекомендацій з виконання рятувальних робіт на висоті, а також професійної підготовки рятувальника-верхолаза.

Обмеженням, яке притаманне такого роду дослідженням щодо кількісної порівняльної оцінки впливу чисельності складу рятувальних груп, а також рівня підготовленості рятувальників-верхолазів на час здійснення різних варіантів рятування потерпілого шляхом евакуації в безопорному просторі, може бути невідповідність макетів багатоповерхових будівель реальним висотним спорудам. При цьому навіть за наявної навчально-матеріальної бази складно провести однорідні рандомізовані незалежні експериментальні дослідження для отримання достовірних (на рівні значимості α=0,05) статистичних показників.

Розвиток даного дослідження полягає в переході до імітаційного моделювання на ЕОМ висотно-рятувальних робіт, яке спирається як на отримані з рівнем значимості α=0,05 узагальнені результати експериментальних випробувань, так і на результати застосування методу безпосередніх експертних оцінок для отримання статистичних характеристик для тих умов, які неможливо було провести. В останньому випадку, не обійтись без їх порівняння, хоча б на вербальному рівні, з результатами фізичного моделювання. Крім цього, вимагатимуть свого вдосконалення існуючі методи перевірки достовірності розроблених імітаційних моделей проведення висотно-рятувальних робіт.

8. Висновки

1. Обґрунтовано порядок проведення порівняльного аналізу різних варіантів здійснення висотно-рятувальних робіт з урахуванням як рівня підготовленості ря-

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

тувальників-висотників, так і повноти складу рятувального підрозділу полягає в проведенні експериментальних досліджень щодо рятування потерпілого з висоти 15 м, що відповідає рятуванню з четвертого поверху, уподовж зовнішньої стіни багатоповерхової будівлі за допомогою як щита спинального іммобілізаційного, так і нош рятувальних особовим складом рятувальників базового та початкового рівня підготовки групами повного та неповного складу з подальшою статистичною оцінкою отриманих експериментальних результатів у відповідності до критеріїв Шапіро-Уілкі, Фішера та Стьюдента.

2. Статистичний порівняльний аналіз результатів експериментального дослідження різних варіантів проведення висотно-рятувальних робіт з порятунку постраждалого показав, що всі вони описуються нормальним розподілом незалежно від варіанта рятування потерпілого, рівня підготовленості особового складу та їх кількості в оперативному розрахунку рятувальної групи. При цьому всі ці фактори суттєво впливають на час проведення рятувальних робіт. Працездатність та достовірність отриманих результатів підтверджене практичним співпаданням (з рівнем значимості α=0,05) експериментальних результатів щодо рятування потерпілого з висоти 15 м за допомогою нош рятувальних вогнезахисних, які були отримані розрахунками повної чисельності та базового рівня підготовленості на макетах багатоповерхових будівель в різних регіонах України. Визначені властивості необхідно враховувати під час складання методичних рекомендацій з виконання рятувальних робіт на висоті, основу яких повинна складати розробка чіткого, зрозумілого алгоритму дій як для повного складу рятувальної групи, так і для зменшеної її кількості з визначенням додаткових етапів та елементів для кожного рятувальника-верхолаза.

Література

1. Zare S., Hemmatjo R. Comparison of the effect of typical firefighting activities, live fire drills and rescue operations at height on firefighters' physiological responses and cognitive function. Ergonomics. 2018. Vol. 61(10). P. 1–26. doi: 10.1080/00140139.2018.1484524

2. Roseane M., Shalimar G., Patrícia K. Knowledge in critical events: Know-how at work of emerging country firefighters. International Journal of Disaster Risk Reduction. 2022. Vol. 81. P. 54–79. doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103294

3. The Importance of a Working at Height Rescue Plan. URL: https://humanfocus.co.uk/blog/the-importance-of-a-working-at-height-rescue-plan/

4. Selman J., Spickett J., Jansz J., Mullins B. Confined space rescue: A proposed procedure to reduce the risks. Safety Science. 2019. Vol. 113. P. 78–90. doi: 10.1016/j.ssci.2018.11.017

5. Gong J., Yaolin L. Evaluating the Evacuation and Rescue Capabilities of Urban Open Space from a Land Use Perspective: A Case Study in Wuhan, China. International Journal of Geo-Information. 2017. Vol. 6(7). P. 227–243. doi: 10.3390/ijgi6070227

6. Seven parts of an in-house rescue plan for working at heights. URL: https://www.ishn.com/articles/113696-7-parts-of-an-in-house-rescue-plan-for-working-at-heights

7. Milani M., Roveri G., Falla M. Occupational Accidents Among Search and Rescue Providers During Mountain Rescue Operations and Training Events. Emergency medical services brief research report. 2022. Vol. 81. P. 699–705. doi: 10.1016/

j.annemergmed.2022.12.015

8. Safe Work at Height. URL: https://www.ukfrs.com/sites/defaHeight.pdf

9. Working at height Rules for the use of work equipment intended for temporary work at height. URL: https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/working-height

10. When working at heights, workers need a fall rescue plan. URL: https://weeklysafety.com/blog/fall-rescue

11. Training is key when working at height. URL: https://www.ishn.com/articles/112347-training-is-key-when-working-at-height

12. Hassanain, M. A. On the challenges of evacuation and rescue operations in high-rise buildings. Structural Survey. 2009. Vol. 27. P. 109–118. doi: 10.1108/02630800910956443

13. Максимов А. В., Ковальов П. А., Стрілець В. М. Порівняльний аналіз рятунку постраждалого в ношах рятувальних вогнезахисних. Проблеми пожежної безпеки. 2019. № 45. С. 108–116.

14. ДСТУ ISO 5479:2009. Статистичне опрацювання даних. Критерії відхилення від нормального розподілу (ISO 5479:1997, IDT). Чинний від 01.07.2011. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, «Наука», 1971. 576 с.

15. Халафян А.А. STATISTICA 6 Статистический анализ данных / А.А. Халафян. – ООО «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

***D. Beliuchenko*[1]**, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
***A. Maksymov*,[1]** *Senior Lecturer of the Cycle*
***V. Strelets*,[2]** *DSc, Professor, Senior Lecturer of the Department*
***O. Burmenko*[1]**, *PhD, Lecturer of the Department*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*Interregional Center for Humanitarian Demining and Rapid Response of the State Emergency Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

COMPARATIVE ANALYSIS OF RESCUE OPERATIONS TO RESCUE A VICTIMS AT A HEIGHT

A quantitative comparative assessment of the influence of the size of the rescue teams, as well as the level of preparedness of the rescuers-climbers on the time of implementation of various options for rescuing the victim by evacuation in an unsupported space, was carried out, which will contribute to solving the problem of reducing the time of rescue work at height without reducing the level of safety as a personnel rescue teams, as well as victims who require evacuation in an unsupported space. A comparative assessment of various options for height rescue operations was carried out, taking into account both the level of training of rescuers and the completeness of the rescue unit. with the help of both a spinal immobilization shield and rescue stretchers by the personnel of rescuers of the basic and initial level of training in groups of full and part-time staff in accordance with the criteria of Shapiro-Wilkie, Fisher and Student. It is shown that the time distribution of height rescue operations according to the options considered with a significance level of α=0,05 can be considered normal. At the same time, the mathematical expectation of the time of height rescue work at height for the specified options differs significantly not only depending on the technical capabilities of the special equipment and safety devices used, but also on the level of preparedness of the rescuer-climber and the size of the rescue team. These properties must be taken into account when drawing up methodological recommendations for performing rescue work at height, as well as professional training of a rescuer-climber. The reliability of the obtained estimates was confirmed by comparison with the results of research conducted in 2018–2019.

Keywords: special equipment, safety equipment, high-altitude rescue operations, rescue climber

References

1. Zare, S., Hemmatjo, R. (2018). Comparison of the effect of typical firefighting activities, live fire drills and rescue operations at height on firefighters' physiological

© Д. Ю. Белюченко, А. В. Максимов, В. М. Стрілець, О. А. Бурменко

responses and cognitive function. Ergonomics, 61(10), 1–26. doi: 10.1080/00140139.2018.1484524

2. Roseane, M., Shalimar, G., Patrícia, K. (2022). Knowledge in critical events: Know-how at work of emerging country firefighters. International Journal of Disaster Risk Reduction, 81, 54–79. doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103294

3. The Importance of a Working at Height Rescue Plan. Available at: https://humanfocus.co.uk/blog/the-importance-of-a-working-at-height-rescue-plan/

4. Selman, J., Spickett, J., Jansz, J., Mullins, B. (2019). Confined space rescue: A proposed procedure to reduce the risks. Safety Science, 113, 78–90. doi: 10.1016/j.ssci.2018.11.017

5. Gong, J., Yaolin, L. (2017). Evaluating the Evacuation and Rescue Capabilities of Urban Open Space from a Land Use Perspective: A Case Study in Wuhan, China. International Journal of Geo-Information, 6(7), 227–243. doi: org/10.3390/ijgi6070227

6. Seven parts of an in-house rescue plan for working at heights. Available at: https://www.ishn.com/articles/113696-7-parts-of-an-in-house-rescue-plan-for-working-at-heights

7. Milani, M., Roveri, G., Falla, M. (2022). Occupational Accidents Among Search and Rescue Providers During Mountain Rescue Operations and Training Events. Emergency medical services brief research report, 81, 699–705. doi: org/10.1016/j.annemergmed.2022.12.015

8. Safe Work at Height. Available at: https://www.ukfrs.com/sites/defaHeight.pdf

9. Working at height Rules for the use of work equipment intended for temporary work at height. Available at: https://oshwiki.osha.europa.eu/en/themes/working-height

10. When working at heights, workers need a fall rescue plan. Available at: https://weeklysafety.com/blog/fall-rescue

11. Training is key when working at height. Available at: https://www.ishn.com/articles/112347-training-is-key-when-working-at-height

12. Hassanain, M. A. (2009). On the challenges of evacuation and rescue operations in high-rise buildings. Structural Survey, 27, 109–118. doi: 10.1108/02630800910956443

13. Maksymov, A., Kovalov, P., Strelec, V. (2019). Comparative analysis of the rescue of the victim with the help of stretcher rescue flame retardant. Fire Safety Problems, 45, 108–116. Available at: https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol45/Maksimov.pdf

14. Statystychne opratsiuvannia danykh. Katehorii vidkhylennia vid normalnoho rozpodilu [Statistical interpretation of data – Tests for departure from the normal distribution]. (1971). DSTU ISO 5479:2009(ISO 5479:1997, IDT) from 1stJule 2011. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 576.

15. Khalafyan, A. (2007). STATISTICA 6 Statystychnyi analiz danykh. Binom-Press, 512.

Надійшла до редколегії: 26.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

УДК 614.833:544.169:539.199

Д. Г. Трегубов, *к.т.н., доцент, докторант (ORCID 0000-0003-1821-822X)*
Л. М. Трефілова, *д.т.н., с.н.с., проф. каф. (ORCID 0000-0001-9061-4206)*
Є. Д. Слепужніков, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-5449-3512)*
Д. Л. Соколов, *к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0002-7772-6577)*
Ф. Д. Трегубова*, студентка (ORCID 0000-0003-2497-7396)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

СПІВВІДНОШЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ У ГОМОЛОГІЧНИХ РЯДАХ ВУГЛЕВОДНІВ

Досліджено кореляції між властивостями горючих речовин у гомологічних рядах н-алканів та н-спиртів довжиною n_C=1–20 для визначення способів підвищення збіжності методик оцінки параметрів пожежної небезпеки. Проведено добір параметрів речовини, які можуть бути моделюючими; до них віднесено довжину кластеру. Звернуто увагу, що наразі властивості речовин прогнозують за грубозернистою моделлю молекул, яка має дискретність, не описує короткі молекули, потребує індивідуального підходу. Виділено 6 послідовних рівнів властивостей речовини, які створюють ланцюг формування певних параметрів пожежної небезпеки. Показано, що є «арифметичні» параметри речовини, які напряму залежать від кількості певних атомів. Серед них «довжина» краще відбиває ізомерні, конформні, кластерні відмінності, з якими пов'язані аномалії параметрів вуглеводнів. Залежності класифіковано на «лінійного» та «експоненційного» типу. Лінійний опис теплоти випаровування від n_C окремо н-алканів та н-спиртів дає R=0,999. Експоненційна апроксимація температур кипіння $t_{кип}$ та спалаху $t_{сп}$ н-алканів за частками зміни n_C має R=0,999. Показано наявність кореляції між $t_{сп}$ та $t_{кип}$, але з системною відмінністю, що свідчить про не повну подібність кластерного складу за цих температур; між $t_{сп}$ та $t_{пл}$ – менша кореляція, але її наявність свідчить про часткову подібність кластерного складу. Створено універсальну формулу для прогнозування теплоти випаровування вуглеводнів 10 гомологічних класів, яка має R=0,996. Опис пульсацій зміни $t_{пл}$ вуглеводнів здійснено на підставі зміни принципів організації кластерів у гомологічному ряду з врахуванням їх довжини та молярної маси, що дає R=0,9997. За аналогічними принципами розроблено формулу для опису розчинності у воді вуглеводнів, яка працює з задовільною точністю. Дослідження показало, що довжина кластеру є визначальним показником, за яким модулюються властивості речовини.

Ключові слова: вуглеводні, густина, в'язкість, поверхневий натяг, водорозчинність, характерні температури, кластер, пожежна небезпека

1. Вступ

Фізико-хімічні властивості речовин обумовлюють усі напрямки їх використання та зберігання. Не є винятком й така сфера діяльності, як «Пожежна безпека». Відповідний науковий напрямок можна сформулювати як «матеріалознавство надзвичайних станів». При цьому вирішуються питання поведінки речовин та матеріалів за підвищених температур, тисків та інших агресивних факторів пожежі, що буде визначати стійкість будівельних конструкцій та пожежної навантаги. У межах відповідних досліджень окремим та більш складним завданням є визначення горючості, режимів виникнення, поширення та завершення горіння матеріалів, зокрема вуглеводнів; так, жодна існуюча розрахункова методика не є достатньо універсальною для проведення відповідного прогнозування [1]. Тому, особливо для твердих речовин, поширені експериментальні методи визначення властивостей [2]. Розв'язання означених питань потребує розуміння комплексу впливів усіх фізико-хімічних властивостей речовини у їх взаємозв'язку на певний параметр, який визначає конкретний аспект поведінки та небезпечності матеріалів під час пожежі. Це, у свою чергу, потребує визначення рівнів та послідовності такого взаємозв'язку певних параметрів речовини. На даний час такі завдання остаточно не вирішені та потребують проведення подальших досліджень.

© Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

Систематизовані дослідження в області означеної проблеми допоможуть уточнити існуючі методики та розробити нові для прогнозування параметрів фізико-хімічних властивостей речовин за умов розвитку пожеж, у тому числі й параметри пожежної небезпеки. У цьому напрямку майже не розглянутим питанням є врахування у відповідних методиках та моделях особливостей надмолекулярної будови речовини, не існує чітких параметрів які відбивають у розрахунках наявність та відмінність таких структур. Але саме надмолекулярну будову наразі вважають мінімальною структурною одиницею речовини. Передбачається, що проведення відповідних досліджень дозволить підвищити адекватність прогнозування багатьох параметрів речовини та підвищити рівень забезпечення пожежної безпеки взагалі.

Означений стан питання прогнозування фізико-хімічних властивостей речовини свідчить про актуальність та перспективність проведення додаткових досліджень щодо створення нового розрахункового базису для різних областей матеріалознавства.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Вирішення означеної проблеми передбачає проведення досліджень у двох площинах: виявлення фундаментального показника речовини, за яким можна прогнозувати її певні фізичні властивості, та вплив цього показника на параметри пожежної небезпеки. Найпростіший спосіб виявлення означених кореляцій полягає у візуальному співставленні масштабованих графічних залежностей та аналізу їх нелінійностей.

Порівнювати показники властивостей речовини (у межах однієї залежності або між їх різними типами) необхідно за стандартизованих умов: 1) за однакової температури – але діапазони існування речовин даного гомологічного ряду в одному агрегатному стані можуть не перекриватися; 2) під час однакових процесів, наприклад, за температури плавлення або кипіння – але при цьому у речовині міститься різна кількість енергії. Також зауважимо, що за довідковими даними [3, 4] часто виявляється неможливим дотриматись першої або другої методики. Проблемою при розрахунковому прогнозуванні є осциляційність або ступінчастість зміни певних параметрів речовини у гомологічному ряду, що сучасними практичними методиками розрахунків не враховується. Причиною цих аномалій можуть бути особливості організації найменшої надмолекулярної будови речовин як в межах одного гомологічного ряду, так і для різних класів.

Надмолекулярна будова має різні характеристики для різних агрегатних станів. Для твердого – вона переважно регулярна; перехід у рідкий стан відбувається за температур плавлення $t_{пл}$, але це не завжди супроводжується зміною кристалічної будови. Цей процес проходить за температури «переходу» $t_{тг}$, яка іноді збігається з $t_{пл}$, а іноді – ні [5]. У рідкому стані можуть залишатися фрагменти кристалічної будови у вигляді кластерів з різним координаційним числом, а також окремі молекули [6]. Тоді виникає нерегулярна будова з певною пропорцією вмісту вказаних складових, причому за збільшення температури рідини зменшується частка крупних кластерів та збільшується частка окремих молекул. Тим не менш, для окремих речовин, наприклад, для мурашиної кислоти, відмічається стабільне випаровування у вигляді димерів [7].

Для більшості речовин у газоподібному стані можна очікувати наявність

лише мономолекулярного складу. Це передбачає достатність для прогнозування процесів горіння речовин у газоподібному стані користування параметрами та властивостями окремих молекул без додаткових припущень. Але відомо, що під час горіння на його проміжних стадіях утворюються пероксидні сполуки [8], а під час розвитку фізичного самозаймання вугілля – пероксидні комплекси [9]. Ці проміжні сполуки нестійкі та розкладаються, що призводить до подальшого розвитку процесів виникнення горіння. Тоді й для газоподібного стану перед утворенням пероксидних сполук можна передбачити першу стадію ініціації горіння з утворенням надмолекулярної будови у вигляді пероксидних кластерів. Тому врахування кластерної будови речовини дозволяє прогнозувати не лише температури плавлення [10], а також й процеси горіння [11], причому структура пероксидних кластерів (комплексів) може відрізнятися за різних концентрацій горючої речовини та окисника у суміші.

Так, помічено взаємозв'язок між властивостями речовини у твердому стані та деякими параметрами пожежної небезпеки у газоподібному стані [12]. Таке явище можливо, наприклад, за умов у хвилі стиснення фронту полум'я, де можуть утворитися проміжні надмолекулярні продукти та як більш важкі – конденсуватися. Таке припущення потребує перевірки, на першому етапі – опосередкованої. Одним з можливих тестів такого взаємозв'язку є виявлення осциляційності певних параметрів у гомологічному ряду органічних сполук. А поясненням такої осциляційності може бути різний принцип кластеризації «парних» та «непарних» молекул за кількістю атомів карбону [10], бо мономолекулярний стан не надає підстав для пояснення такого ефекту.

Про зміни у надмолекулярній будові під час фазових переходів свідчить наявність таких параметрів речовини як теплота плавлення та теплота випаровування. Оскільки відповідні процеси потребують поглинання певної кількості теплоти, то цей процес можна порівняти з протіканням хімічної реакції, внаслідок якої утворюються інші хімічні сполуки. Так само як за хімічних реакцій утворюються нові продукти, так й за фазового переходу утворюється нова надмолекулярна будова з іншим ступенем кластеризації (при плавленні та випаровуванні цей ступінь зменшується аж до мономолекулярного стану). Найбільш близьким аналогом є процес розкладання полімероподібних сполук під впливом температури.

Так, азеотропні суміші рідин можна вважати такими, за яких їх склад містить лише однотипні кластери, тому такі суміші можна вважати новою хімічною речовиною з новими фізичними властивостями. За інших складів сумішей даних речовин існує деяка частка цього азеотропного кластеру у загальній суміші кластерів. Азеотропні суміші не підкоряються законам адитивності внесків складових, тому характерні температури можуть бути як меншими, так і більшими за відповідні значення для окремих компонентів [13]. Це означає, що у суміші утворюється більший або менший кластер порівняно з індивідуальними рідинами.

Прогнозування широкої номенклатури параметрів речовини здійснено у роботі [14] на прикладі розгляду молекули н-спирту (n_C=2–12), як сукупності твердих кульок обмеженої кількості, які заповнюють певну матрицю відповідно до грубозернистої моделі молекули. Одна кулька представляє ОН-групу, а інші – групи атомів карбону по 2–4 штуки. Тобто для моделювання групування атомів карбону відбувається за «ручним» механізмом, а отримані за результатами такого прогнозування значення густини, теплоти пароутворення, поверхневого натягу та вільної енергії сольватації для спиртів не відбивають осциляційності цих парамет-

© Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

рів, а мають лінійний характер. Крім того, дана методика не працює для метанолу. За рахунок групування довжин спиртів автори враховують певні внутрішньо молекулярні електронні ефекти, міжмолекулярну взаємодію, але напряму не враховують надмолекулярну будову. Тому, за наступним аналізом, означена модель без додаткових припущень не буде працювати для більш довгих н-спиртів, наприклад, для прогнозування густини.

Аналогічну грубозернисту модель молекул використовують й для прогнозування властивостей н-алканів [15]. При цьому, оперуючи групуванням атомів карбону по 2–4 штуки розраховують умовні міжмолекулярні силові поля, що дозволяє визначати такі властивості як густина, теплота пароутворення, поверхневий натяг та коефіцієнт внутрішньої дифузії для н-алканів з n_C=5–17. Нижнє обмеження працездатності даної методики визначається більшою коливальністю зміни властивостей у гомологічних рядах для малих довжин молекул та неможливістю її застосування для перших членів гомологічних рядів. Дискретність добору схеми згрупованих кульок викликає також дискретні помилки розрахунку. Існують аналогічні розрахунки й для більш довгих молекул, але добір набору «кульок» здійснюється окремо для кожної молекули, наприклад, для октакозану n_C=28 [16]. Розроблюють аналогічні методики для наявності у молекулах слабких полярних та інших груп [17, 18] і навіть ця статистична асоційована теорія рідин застосовується для молекулярного моделювання полімерних систем [19]. Але відповідні схеми моделювання мають вже означені вище проблеми, головною з яких є відсутність врахування будови тимчасових надмолекулярних структур.

Проведений аналіз досліджень, присвячених аналізу та прогнозуванню властивостей речовини у гомологічних рядах вуглеводнів, показав, що у них переважає однобічний підхід до вирішення цього питання. Для моделювання силових полів, які утримують молекули разом у вигляді рідини, що й формує її властивості, застосовують дискретне відображення молекул у вигляді певним чином обмеженої кількості кульок. Але при цьому не розглядають наявність надмолекулярних структур кластерного типу та способів групування молекул за принципом «парності-непарності». Тому такі моделі дають похибку близько 7 % [14] і не відображають коливальностей зміни параметрів у гомологічних рядах.

Таким чином, на даний момент не існує методик прямого врахування надмолекулярної будови речовини для прогнозування параметрів її фізико-хімічних властивостей. Опосередкованим шляхом виходу на будову цих структур є виявлення аномалій у зміні певних параметрів властивостей речовини, які можна пояснити та описати з врахуванням наявності певних кластерів у твердому та рідкому стані речовини.

Виходячи з проведеного аналізу, невирішеною частиною проблеми адекватного прогнозування параметрів фізико-хімічних властивостей речовин, зокрема вуглеводнів, є відсутність ґрунтовного та чіткого параметру для врахування їх надмолекулярної будови.

3. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є встановлення визначального параметру речовини для різних агрегатних станів та процесів, який дозволяє прогнозувати певні параметри речовини з найменшою похибкою.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких завдань:

– проаналізувати рівні взаємозв’язку фізико-хімічних величин у полі власти-

востей речовини;

– виявити особливості зміни параметрів речовини у гомологічних рядах вуглеводнів та запропонувати розрахункові моделі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є фізико-хімічні властивості вуглеводнів.

Предметом дослідження є кореляційні залежності між параметрами фізико-хімічних властивостей вуглеводнів.

Гіпотезою дослідження є можливість виявлення синхронних аномалій у зміні деяких параметрів фізико-хімічних властивостей речовини як наслідок особливостей надмолекулярної будови, що дозволить встановити покращені кореляційні залежності.

Методом дослідження є проведення порівняльного аналізу відносно моделюючого параметру – кількості атомів карбону у вуглеводні для сполук даного гомологічного ряду або за часткою зростання даного показника зі встановленням парних або багатофакторних кореляційних залежностей з пошуком виходу на використання параметрів надмолекулярної будови.

У роботі проведено аналіз даних щодо зміни фізичних властивостей у гомологічних рядах вуглеводнів на прикладі н-алканів та н-спиртів із довжиною карбонового ланцюга n_C=1–20. Для порівняльного аналізу обрано наступні фізичні та фізико-хімічні властивості: температура плавлення $t_{пл}$, кипіння $t_{кип}$, спалаху $t_{сп}$, самоспалахування $t_{сс}$, густина ρ, розчинність у воді γ, в'язкість ν, поверхневий натяг σ, теплота випаровування $H_{вип}$. Ці властивості або є безпосередньо параметрами пожежної небезпеки, або враховуються для прогнозування поведінки горючих матеріалів під час пожежі або поведінки вогнегасних речовин під час її гасіння.

Значення параметрів для візуального співставлення масштабовано у межах від 0 до 10. Для параметрів, які змінюються на багато порядків (в'язкість, розчинність), вживано не просту пропорційність, а більш складні функції перерахунку. Для масштабування прийнято певні функції f(x); для н-алканів: $f(\rho)=(20(\rho-0{,}4)+2)$, $f(\sigma)=500(\sigma-0{,}01)$, $f(\gamma)=6\gamma^{0,1}$, $f(\nu)=3\nu^{0,5}$, $f(H_{вип})=(H_{вип}/15+3)$, $f(t_{пл})=(t_{пл}+200)/30$, $f(t_{кип})=(t_{кип}+170)/70$, $f(t_{сс})=(t_{сс}-200)/35$, $f(t_{сп})=(t_{сп}+190)/40$; для н-спиртів: $f(\gamma)=6\gamma^{0,1}$, $f(\nu)=(\nu-0{,}5)/2$, $f(\rho)=200(\rho-0{,}79)$, $f(\sigma)=1000(\sigma-0{,}02)$, $f(H_{вип})=H_{вип}/10$, $f(t_{пл})=(t_{пл}+130)/20$, $f(t_{кип})=t_{кип}/40$, $f(t_{сп})=t_{сп}/20$, $f(t_{сс})=(t_{сс}-200)/30$. Для з'ясування відхилень залежності між двома параметрами, які виявили близький характер зміни у гомологічному ряду, масштабування здійснювалося у межах від 0 до 1 (від найменшого до найбільшого значення). Дані щодо значень обраних параметрів для досліджуваних речовин головним чином добирались на інтернет-ресурсах PubChem та NIST [3, 4].

Кореляційні залежності для параметрів речовини, що розглядаються, будувалися відносно моделюючого параметру – кількості атомів карбону у вуглеводні для сполук даного гомологічного ряду або за часткою зростання даного показника, також розглядалися взаємні кореляції між певними показниками властивостей речовини. Математичний опис певної залежності створювався на підставі побудови ліній «тренда» у програмному середовищі «Excel», причому опис поліномом розглядався в останню чергу. Надалі ця залежність за необхідності коригувалася введенням додаткових параметрів.

У ході аналізу, що проводиться, очікуваними профілями зміни залежностей є лінійний – оскільки наступний гомолог у ряду вуглеводнів нормальної будови дов-

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

ший та важчий за попередню сполуку на фіксоване значення, групу CH_2, або наближений до експоненційної залежності – оскільки внесок довжини та ваги цієї групи у загальний параметр зменшується. Так, у ряду н-алканів зростання «арифметичних» параметрів речовини відбувається на стале значення: довжини молекули – на $\Delta n_C=1$, стехіометричного коефіцієнту реакції горіння – на $\Delta\beta=1,5$, молярної маси – на $\Delta M=14$ г/моль, тобто зростання відбувається лінійно; але частка зростання цих параметрів на частині гомологічного ряду від етану до ейкозану змінюється за принципом $(A_{n+1}–A_n)/A_n$ у межах: $r_\beta=0,75–0,052$, $r_M=0,875–0,052$, $r_{nc}=1,0–0,0526$ (рис. 1). Вказані параметри поводять себе ідентично з R=0,999. У ряду н-спиртів зростання довжини молекули відбувається на $\Delta n_C=1$ (але починаючи з $n_{C+O}=2$), коефіцієнту β – на $\Delta\beta=1,5$ (але починаючи з $\beta=1,5$), молярної маси – на ΔM =14 г/моль (але починаючи з M=32), тому діапазони зміни часток зростання цих параметрів від етанолу до ейкозанолу відносно н-алканів відрізняються: $r_\beta=1,0–0,053$, $r_M=0,4375–0,054$, $r_{nc}=0,5–0,05$ (рис. 1). Параметри зростання цих показників та часток їх зростання можна використовувати у залежностях прогнозування інших показників у якості калібруючих та моделюючих, але з них для врахування особливостей кластерної будови або ефекту глобулізації довгих молекул підходить лише n_C.

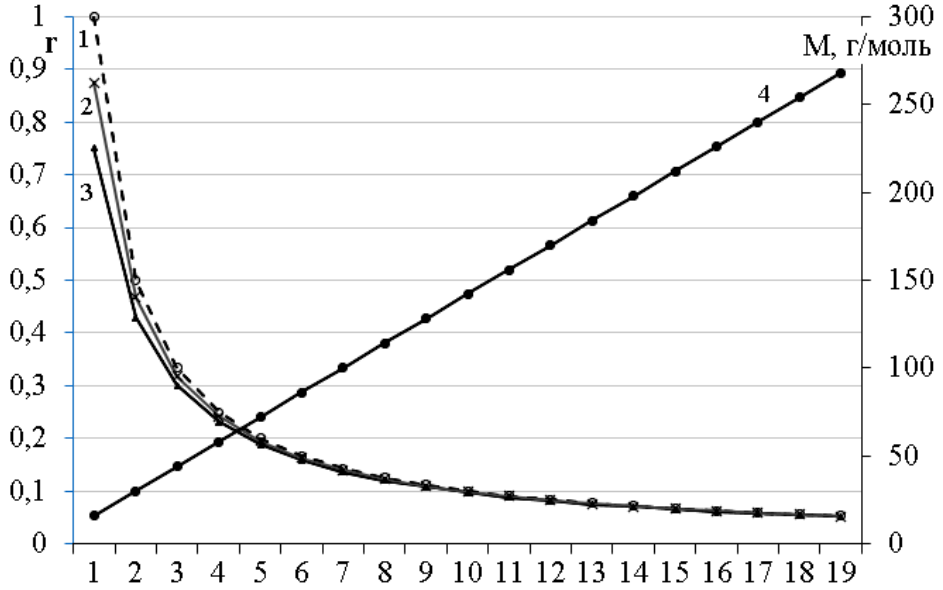


Рис. 1. Зміна абсолютного значення та частки «арифметичних» параметрів у ряду н-алканів: 1, 2, 3 – зміна часток зростання n_C, M, β; 4 – зростання M

Аналіз властивостей вуглеводнів проводився виходячи з припущення існування кластерної будови з певним координаційним числом. Прийнято, що кластери вуглеводнів однакової довжини з однаковою молярною масою формують речовину з однаковою температурою плавлення [10]:

$$t_{пл}=101,85\ln(n_M)–452,37,\ ^oC, \quad (1)$$

де n_M – показник легкості плавлення: $n_M=n_{Секв}M_{екв}^{0,2}$; $n_{Секв}$ – еквівалентна довжина кластеру, яка розраховується з врахуванням особливостей гомологічних класів та ізомерної будови, для димеру лінійних молекул – це кількість атомів карбону у безперервному ланцюзі за умови сполучення кінцевими або не кінцевими атомами кар-

бону; $M_{екв}$ – молярна маса кластеру, пропорційна до його координаційного числа відносно молярної маси мономерного стану (координаційне число «1»), г/моль.

Показник «легкості плавлення» передбачає більший внесок у формування $t_{пл}$ довжини кластеру, ніж його молярної маси. Ця формула дозволяє оптимізувати для розрахунків очікуваний розмір кластеру. Для проведення такого аналізу за формулою (1) вирішується зворотна задача: за відомою температурою плавлення визначається показник «легкості плавлення». Далі – оптимізується співвідношення між молярною масою кластеру, його координаційним числом та довжиною, яка і є вихідним параметром оптимізації та використовується для пошуку кореляцій з іншими властивостями речовини.

Для розчиненого у воді стану вуглеводню проміжною ланкою у кластері прийнято молекулу води, що збільшує довжину кластеру на «1», але вихідний принцип будови найменшого такого кластеру визначали за методикою для твердої речовини за $t_{пл}$ [10], яка передбачає визначення коефіцієнту кластеризації $K_{тв}$ та місця кластеризації за довжиною карбонового ланцюга. З формули (1) за відомою $t_{пл}$ визначається показник легкості плавлення n_M, обирається кілька значень коефіцієнту кластеризації у розчині $K_{розч}$ з відповідними молярною масою кластеру M та довжиною кластеру $n_{Cмод}$ (яка відповідає даній моделі). Але за формулою для показника n_M виникає ряд відповідних розрахункових значень довжини кластеру $n_{Cрозр}$. Модель кластеру з еквівалентною довжиною $n_{Cмод}$, яка дає найменшу похибку ітерації з $n_{Cрозр}$ приймається за характерну для даних умов існування речовини.

5. Результати аналізу рівнів фізико-хімічних величин у полі властивостей речовини

Для розуміння механізмів формування певних параметрів пожежної небезпеки на рис. 2 наведено «генетичні» рівні взаємозв'язку параметрів властивостей речовини починаючи з атомарного рівня через формування первинних фізико-хімічних властивостей до формування пожежонебезпечних властивостей з відповідними параметрами.

Вихідні умови середовища необхідно віднести до первинного рівня факторів, які визначають зміни у властивостях речовини. Вихідним фактором також є атомарний склад речовини, що формує молярну масу M.

На другому рівні факторів працює спосіб організації атомів у молекулу: типи хімічних зв'язків, структурні особливості молекули, що буде проявлятися у різних середній довжині молекули $l_{сер}$ та кількості каркасних атомів n_C.

На даний час вважають, що ці два рівня й формують властивості речовини та як поправку враховують міжмолекулярні зв'язки. Але аналіз показав [10, 12], що на властивості речовини значний вплив надає надмолекулярна будова. Тоді керуючими параметрами стають еквівалентна довжина кластеру, його молярна маса та кількість каркасних атомів. Відповідно, всі наступні рівні властивостей речовини будуть визначатися саме властивостями кластерів. У той же час, для твердого, рідкого, газоподібного станів та для процесів горіння співвідношення вмісту цих кластерів, їх розмір та просторова будова будуть різними.

Четвертим рівнем прийнято властивості, пов'язані з фазовими переходами, енергетичним станом молекул, протіканням хімічних реакцій, а також параметри фізичного стану речовини.

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

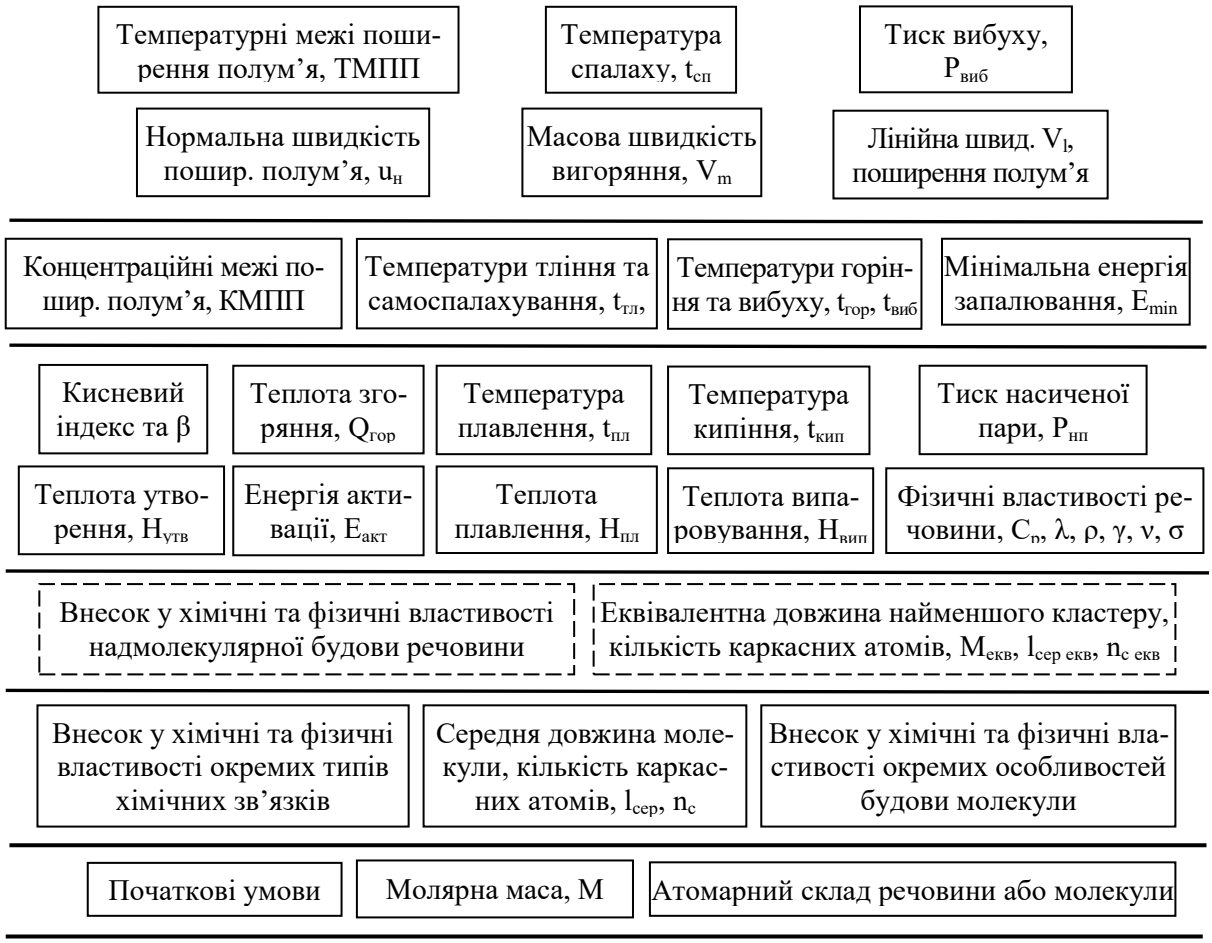


Рис. 2. Рівні властивостей речовини від фундаментальних до пожежонебезпечних

П'ятий рівень відповідає параметрам переходу стаціонарної хімічної реакції у таку, що самоприскорюється з виходом на процес горіння, а також рівновага процесу горіння. Тобто на цьому рівні виникають вже параметри пожежної небезпеки, але ті з них, які проявляють себе як проміжні з фундаментальними властивостями речовини. Для твердих вуглецевих матеріалів самоприскорення реакції конденсованого стану починається за температури тління, для газових повітряних сумішей – за температури самоспалахування. При цьому будь-яку горючу систему можна запалити, якщо енергія високотемпературного джерела є більшою за мінімальну енергію запалювання даної речовини. Також на цьому рівні враховано те, що для газових повітряних сумішей горіння може виникнути лише у певному діапазоні концентрацій – від нижньої до верхньої концентраційної межі поширення полум'я.

Шостий рівень складають параметри, які утворюються внаслідок наявності певного ланцюга групування властивостей речовини попередніх рівнів. Так, температурні межі поширення полум'я (ТМПП) та температура спалаху формуються у вигляді певних значень внаслідок наступного ланцюга факторів: атомарний склад – молярна маса молекули – наявність певних хімічних зв'язків – наявність певної структури молекули – наявність надмолекулярної будови у вигляді певної структури кластерів – співвідношення кластерів та молекул у рідині за даної температури – теплота утворення молекул – теплота випаровування – початкові умови – тиск насиченої пари – концентрація пари – властивості джерела запалювання – концентраційні межі поширення полум'я – ТМПП (температура спалаху). У цьому ланцюгу попередній параметр впливає на можливість визначення наступ-

ного. Початкові умови виявилися розташованими у цьому ланцюзі десь посередині, хоча за схемою вони відповідають першому рівню факторів. Оскільки, якщо температура речовини є більшою за критичну, то може руйнуватися або надмолекулярна будова, або сама молекула; тоді розташування ланки «початкові умови» у логічному ланцюзі буде раніше. А властивості джерела запалювання можна вважати фактором, який локально змінює початкові умови у горючій системі.

6. Результати виявлення особливостей зміни параметрів речовини у гомологічних рядах вуглеводнів

Розглянемо характер зміни параметрів н-алканів та н-спиртів з довжиною карбонового ланцюга молекули до n_C=20 шляхом їх співвіднесення у відносних координатах (рис. 3 та 4). Розглянуто наступні масштабовані параметри [3, 4]: температура плавлення $t_{пл}$, кипіння $t_{кип}$, спалаху $t_{сп}$, самоспалахування $t_{сс}$, густина ρ, розчинність у воді γ, в'язкість ν, поверхневий натяг σ, теплота випаровування (пароутворення) $H_{вип}$. Масштаб значень кожного параметру забезпечено у межах від 0 до 10, причому для параметрів які змінюються на багато розрядів вживано не просту пропорційність, а більш складні функції для перерахунку, які зазначено у розділі «Матеріали та методи дослідження».

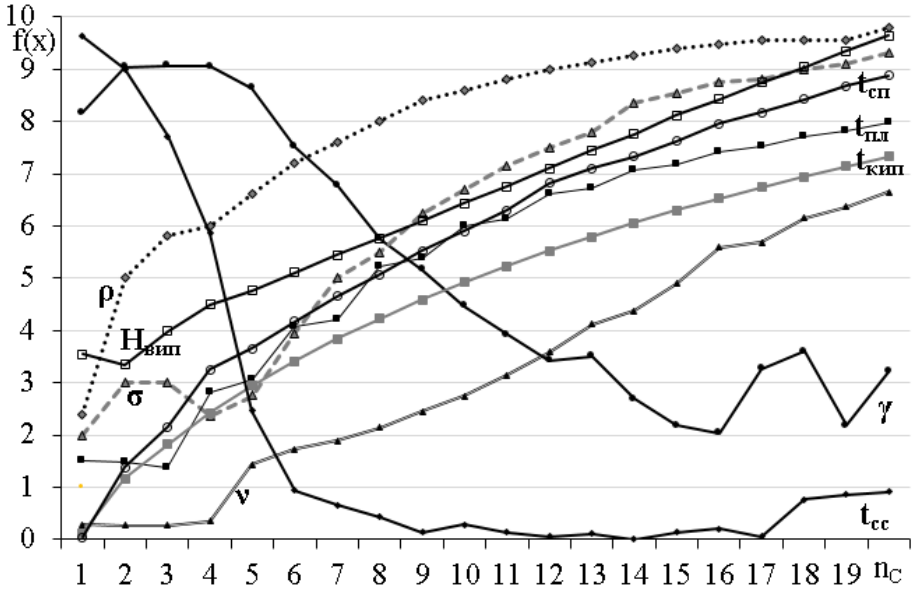


Рис. 3. Співвідношення зміни властивостей н-алканів у відносних координатах

З обраних для проведення аналізу параметрів лише $t_{пл}$ пов'язана з властивостями речовини у твердому стані, у якому можна очікувати явний внесок міжмолекулярної взаємодії у процес формування властивостей речовини. Не зважаючи на це, всі параметри здебільшого на частині досліджуваного діапазону мають коливальності зміни відповідних залежностей у гомологічному ряду, але цей ефект для тих самих членів гомологічного ряду спостерігається не синхронно для всіх параметрів. Ти не менш, можна знайти деякі відповідності для певних ефектів, що спостерігаються зі збільшенням довжини карбонового ланцюга.

У довідковій літературі теж іноді зустрічаються «описки». Тому до «коливальностей» залежностей необхідно ставитись з обережністю та повторно перевіряти певні дані за іншими джерелами, або за поведінкою інших параметрів. Наприклад, нелогічною виглядає аномалія бутанолу для залежності для поверхневого натягу,

© Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

яка має лінійний характер; але синхронна аномалія помітна й для в'язкості. На залежностях $H_{вип}$ та ρ н-алканів помітні синхронні аномалії для етану та пропану, що можна пояснити відсутністю багатьох конформних структур зі складними формами, що визначає більшу щільність упаковки молекул (метан має меншу щільність упаковки через відсутність зв'язку С–С). Тоді виходить, що існують певні аномалії у молекулярній та надмолекулярній будові речовини, які можуть проявлятися як синхронно, так й не синхронно у значеннях певних параметрів.

Явище зміни властивостей вуглеводнів, кратне 5 каркасним атомам у їх безперервному ланцюзі пояснюють «пентановою інтерференцією», що проявляється у стабілізації карбонового ланцюга ланками по 5 каркасних атомів (н-бутанол має 4 каркасних атоми карбону та 1 оксиген). Молекули більшої довжини будуть отримувати додаткові конформні конфігурації внаслідок перегину. Тоді, крім впливу наявності надмолекулярних структур, на ефективну довжину молекули або кластеру буде впливати усереднена довжина конформних конфігурацій даної молекули.

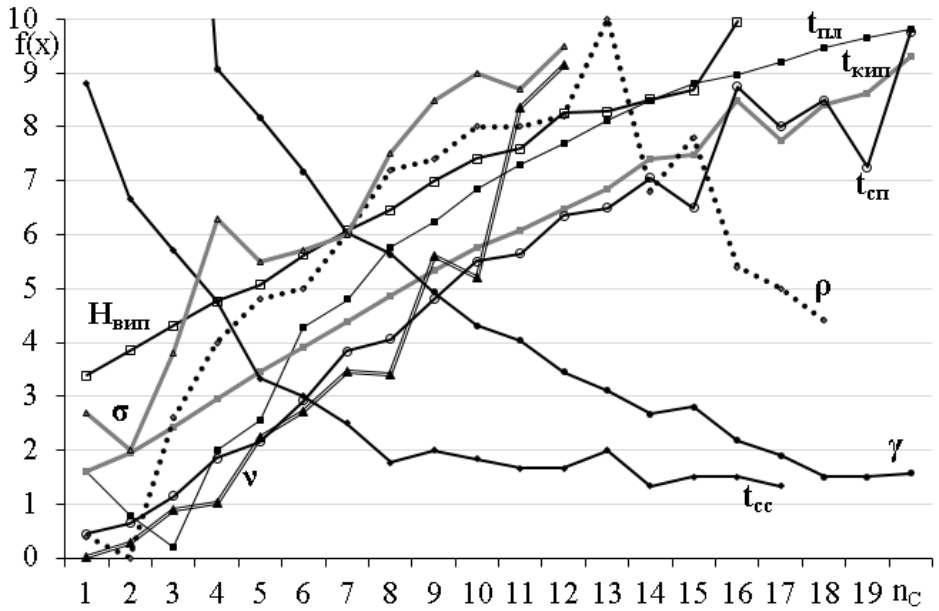


Рис. 4. Співвідношення зміни властивостей н-спиртів у відносних координатах

Розглянемо деякі кореляції між певними параметрами. Так, кореляція між рядами значень $t_{кип}$ та $t_{сп}$ н-алканів становить R=0,999. Якщо для цих рядів найменше значення прийняти за 0, а найбільше за 1, то середнє відхилення буде становити 1,6 % з максимальним відхиленням у 13 %. Тобто, використання $t_{кип}$ для прогнозування $t_{сп}$ або температурних меж поширення полум'я (ТМПП) має під собою підстави, але, водночас, й об'єктивну похибку внаслідок не повної відповідності профілю зміни $t_{кип}$ у гомологічному ряду н-алканів до профілю $t_{сп}$. Ця невідповідність простежується на рис. 3: залежність для $t_{сп}$ має незначні коливальності, подібні до тих, що спостерігаються для $t_{пл}$. Аналогічний спосіб опису $t_{сп}$ через $t_{пл}$ має R=0,98 з середнім відхиленням 13 %. Для н-спиртів за означеною методикою оцінки кореляція між рядами значень $t_{кип}$ та $t_{сп}$ н-алканів становить R=0,99 з середнім відхиленням – 7,3 %, максимальним – 24,4 %; аналогічний опис $t_{сп}$ через $t_{пл}$ має R=0,97 з середнім відхиленням 28 %. Тобто, за температурних умов «$t_{сп}$» залишається певна частка кластерів, які групуються або за принципом «парних», або «непарних» молекул.

З обраних для аналізу властивостей речовини характером найбільш наближеним до лінійного відзначаються лише $H_{вип}$ для н-алканів та н-спиртів, а також для $t_{кип}$ н-спиртів до n_C=14. Для н-спиртів формула $H_{вип}$=37,3+4,75(n_C–1) кДж/моль забезпечує R=0,999 та середнє відхилення 0,8 %; для н-алканів $H_{вип}$=3,5+5,1(n_C–1) кДж/моль – R=0,999 з середнім відхиленням 2 %. Для н-спиртів формула $t_{кип}$=66+17,7(n_C–1) °C забезпечує R=0,999 з середнім відхиленням 1 % для n_C= 1–14, більшість наступних розрахованих $t_{кип}$ вуглеводнів надають завищене значення. Обмеження останньої формули по довжині молекули викликано тим, що пряме врахування кількості атомів карбону не враховує можливих ефектів глобулізації довгих молекул, а також наявності кластерів та способів їх утворення.

Плавні залежності з експоненційним характером можна моделювати на базі «арифметичних» властивостей молекули: довжини каркасного ланцюга, молярної маси, стехіометричного коефіцієнту реакції горіння; але з них перейти на конформну або кластерну будову простіше через параметр «довжини». Частка зростання кількості каркасних атомів зменшується для більш довгих молекул: $r_{пс}=(n_{Cn} - n_{C(n-1)})/n_{C(n-1)}$. Для н-алканів плавністю характеризується $t_{кип}$ та незначні коливання має $t_{сп}$. На підставі $r_{пс}$ можна запропонувати наступні залежності для їх опису у °C для діапазону n_C=1–20 (для метану взято $r_{пс}$=7): $t_{кип}=100/r_{пс}^{0,57}$–185 (R=0,999 з середнім відхиленням 5,7 °C), $t_{сп}=100/r_{пс}^{0,472}$–236 (R=0,999 з середнім відхиленням 3,2 °C). Але більшість інших параметрів речовини мають залежності зміни у гомологічних рядах з коливальностями, ступінчастістю або окремими аномаліями. Для врахування цих явищ необхідно розуміння їх природи та можливих моделей для опису, причому узагальнений підхід для цього не працює, а необхідне внесення індивідуальних коригувань.

Якщо брати до уваги можливість тієї самої довжини наступного гомологу за умови врахування конформних змін або за визначення довжини кластерів з врахуванням ефекту «парності-непарності», то використання часток збільшення стає складнішим, оскільки тоді можуть бути випадки з $r_{пс}$=0 або від'ємними. Також за цим принципом неможливо описати «негативні ефекти» у гомологічних рядах, коли параметр має нетипову зміну на певній ділянці залежності. Так себе поводить $t_{пл}$ у багатьох гомологічних рядах вуглеводнів для перших гомологів [20]. Проведено спробу апроксимувати $t_{пл}$ н-алканів через частки збільшення довжини їх молекули та димеру (димери непарних молекул за кількістю каркасних атомів виявляються на «1» коротшими, ніж кількість каркасних атомів двох молекул): $t_{пл}=(-390+162/r_{пс}^{0,33})\cdot(1-r_{пс\ екв})^{0,4}$, де $r_{пс\ екв}$ – частка зміни довжини кластера між сусідніми гомологами; формула не працює для метану та етану, починаючи з пропану отримано R=0,99 з середнім відхиленням 10 °C. Тобто, кореляції за одним параметром мають місце лише в окремих випадках. Для адекватного прогнозування $t_{пл}$ необхідно врахувати більш ніж димерну будову у твердому стані метану й етану та відповідну масу кластеру. А для прогнозування $t_{сп}$ необхідно додатково враховувати великі стехіометричні коефіцієнти реакції горіння перших гомологів вуглеводнів, що потребує більших температур для утворення відповідних концентрацій.

Температуру кипіння можна вважати температурою руйнування надмолекулярної будови до мономолекулярного стану або до найменшого стабільного кластера (мурашина кислота випаровує у вигляді димерів [7]). Це робить $t_{кип}$ аналогічною до температури піролізу. Якщо проаналізувати мурашину кислоту за формулою (1), то відповідно до $t_{пл}$=8,3 °C на момент плавлення для неї можна запропонувати існування суміші гекса- та гептамерів. Виходить, що за збільшення тем-

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

ператури їх вміст зменшується, утворюються кластери з меншим координаційним числом, а за $t_{кип}$ димери мурашиної кислоти або виникають за поділу та перегрупування кластерів, або ця температура є достатньою для подолання димерами, які існують, сил міжмолекулярної взаємодій. Саме на цей процес витрачається теплота випаровування.

Раніше нами була запропонована універсальна формула для прогнозування $H_{вип}$ для різних гомологічних класів полярних та неполярних рідин: $H_{вип}=8{,}912\cdot10^{-4}T_{кип}+5n(T_{кип}–273)/M^{0{,}05}$ (n для рідин з однією полярною групою становить «1», з більшою кількістю – «N–1»); але область її застосування виявилася обмеженою внаслідок того, що для аналізу було обрано добірку вуглеводнів різних гомологічних класів з n_C=1–8. У поточній роботі нами проведено корекцію цієї формули для досліджуваного діапазону n_C у вигляді:

$$H_{вип}=5\cdot10^{-4}T_{кип}^{1{,}9}+0{,}025k\cdot T_{кип}M^{-0{,}05},\ кДж/моль, \qquad (2)$$

де $T_{кип}$ – температура кипіння, К; M – молярна маса, г/моль; k – коефіцієнт гомологічного ряду: «1» – для н-спиртів, «0,5» – для спиртів ізомерної будови, «0» – для алканів, фенолів.

Для багатьох залежностей на рис. 3 і 4 відмічено наявність осциляційності або пульсацій. Для пояснення та врахування таких аномалій нами був передбачений кластерний принцип надмолекулярної будови вуглеводнів (переважно у вигляді димерів) для прогнозування температур плавлення у гомологічному ряду, що передбачає чергування будови молекул з парною або непарною кількістю атомів карбону або ступінчасті зміни у будові кластерів більшої довжини. З врахуванням цього положення був розроблений показник «легкість плавлення» n_M та на його основі формула (1) для прогнозування $t_{пл}$ масиву з 90 сполук різних гомологічних класів вуглеводнів [10]: алканів нормальної та ізомерної будови, алкенів, алкінів та циклоалканів з кількістю атомів карбону до 15. Однак подальший аналіз виявив, що область її використання обмежена саме цим інтервалом довжин молекул та відповідним діапазоном значень показника n_M. Аналіз показав, що формула (1) для більш довгих алканів, ніж 15 атомів карбону у безперервному ланцюзі, надає кореляцію лише за умови врахування початку конформних перетворень з глобулізацією та відповідним скороченням ланцюга. Глобулу за даною методикою приймаємо як ланку ланцюга з довжиною «1». Для підвищення кореляції формулу (1) було модифіковано у вигляді:

$$t_{пл}=102{,}46\ln(n_M) – 455{,}22,\ ^oC, \qquad (3)$$

що забезпечує R^2=0,9997 для добірки 40 сполук н-алканів та н-спиртів у межах n_C=1–20 та n_M=13–165, рис. 5.

Розглянуто також питання – яку довжину кластеру повинен мати гектан, $C_{100}H_{202}$, відповідно до його $t_{пл}$=115,2 ^oC, щоб відповідати формулі (3); виявилося – 56, тобто 144 атоми карбону кластеру повинні бути у глобулах по його краях (по 72 атоми). Число 56 приблизно відповідає кількості «кульок» (50 шт.) за умови моделювання димеру гектану у межах статистичної асоційованої теорії рідин, коли одна «кулька» моделі представляє 4 атоми карбону [15].

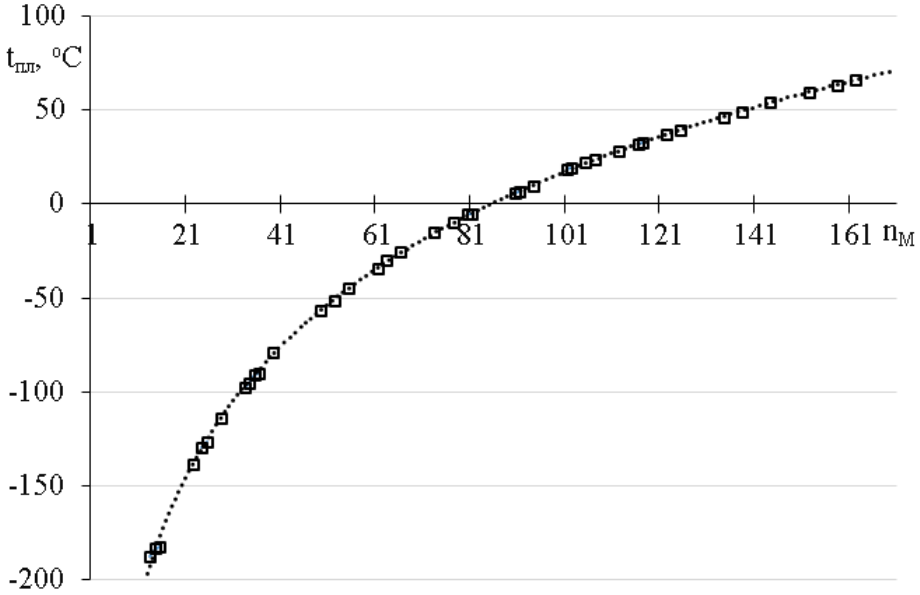


Рис. 5. Модулююча залежність $t_{пр}$ (n_M) для н-алканів та н-спиртів: □ – довідкові дані [3, 4], ••• – розрахунок (3)

Розглянемо можливість врахування кластерної будови речовини для моделювання утворення інших параметрів. Вважаємо, що за температур більших за $t_{пл}$ виникає розчин кластерів з різним координаційним числом аж до мономолекулярного стану. Тоді відповідне прогнозування передбачає застосування статистичних методик. Але все ж таки спробуємо описати за принципом довжини кластерів формування залежності для розчинності у воді.

Відомо, що навіть декілька молекул розчинника іноді можуть структурувати увесь розчин. Тобто, молекули води кластеризуються у свою надмолекулярну структуру паралельно молекулі розчиненої речовини, а тому повторюють її будову. Тоді кількість молекул води n_{H2O}, асоційованих безпосередньо однією молекулою (або кластером) розчиненої речовини, можна оцінити за кількістю атомів карбону та гідрогену вуглеводню (табл. 1).

Будову найменшого кластеру для розчиненого вуглеводню оцінили за раніше розробленою методикою визначення будови та коефіцієнта кластеризації $К_{тв}$ вуглеводнів у твердому стані [10]. За формулою (3) за відомою $t_{пл}$ визначається показник легкості плавлення n_M, за яким з використанням молярної маси кластеру М та очікуваного коефіцієнту кластеризації вуглеводню у розчині $К_{розч}$ (табл. 1) оптимізується через серію паралельних розрахунків очікувана еквівалентна довжина кластеру $n_{Cрозр}$.

Тоді існує така закладена у модель еквівалентна довжина кластеру $n_{Cмод}$, яка дає найменшу похибку ітерації відносно $n_{Cрозр}$, її приймають за характерний параметр речовин. Середня похибка ітерації для н-алканів склала 2,7 %, для н-спиртів для моделі з табл.1–5,5 %, для тримерної моделі ($n_{Cмод}=3(n_C–n_{Cбок})$)–5 %, для тетрамерної ($n_{Cмод}=4(n_C–n_{Cбок})$)–6,5 %. Але для н-спиртів з $n_C>15$ кращу збіжність розрахунку забезпечує тетрамерна модель.

Для прогнозування розчинності вуглеводнів (н-алканів та н-спиртів) у воді на підставі розроблених проміжних параметрів (кількість молекул води, які асоціює молекула або кластер вуглеводню N_{H2O}, еквівалентна довжина лінійного кластеру за участю молекул води n_{C+H2O}) та молярної маси М мономеру запропоновано апроксимаційну формулу:

© Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

$$\gamma = \frac{6{,}5 \cdot 10^{7}}{N_{H_2O} \cdot n_{C+H_2O}^{3,4} \cdot M^{0,9}}, \text{ мг/л} . \quad (4)$$

Табл. 1. Параметри молекул, кластерів та розчинності у воді (мг/л) вуглеводнів

Вуглеводень	М, г/моль	n_M	$n_{Срозр}$	$n_{Смод}$	$K_{тв}$	n_{C+H2O}	N_{H2O}	$\gamma_{експ}$ [4]	$\gamma_{розр}$	$K_{розч}$
н-алкани										
Метан	16	14,3	5,9	6	6	12	31	22,0	37,0	6
Етан	30	14,2	5,9	6	3	9	28	60,0	61,9	3
Пропан	44	13,6	5,7	6	2	8	27	62,4	67,9	2
Бутан	58	22,0	8,7	8	2	8	35	61,0	40,9	2*
Пентан	72	24	9,1	9	2	8	43	38,0	27,4	2*
Гексан	86	33,5	12,3	12	2	10	51	9,5	9,2	2*
Гептан	100	35,1	12,5	13	2	12	59	3,4	3,7	2*
Октан	114	48,8	16,9	16	2	18	67	0,66	0,74	2*
Нонан	128	51,7	17,5	17	2	24	111	0,22	0,15	3*
Декан	142	63,6	21,1	20	2	30	164	0,052	0,044	3*
Ундекан	156	66,2	21,6	21	2	40	171	0,014	0,014	4*
Додекан	170	77,4	24,8	24	2	52	197	0,0037	0,0047	4
Тридекан	184	80,6	25,5	25	2	52	213	0,0047	0,0041	4*
Тетрадекан	198	90,0	28,1	28	2	90	343	0,00033	0,00037	6
Пентадекан	212	93,6	28,8	29	2	144	550	0,00004	0,00004	9
Гексадекан	226	101,5	30,8	31	2	153	586	0,00002	0,00003	9
Гептадекан	240	105,3	31,6	32	2	54	209	0,0023	0,0029	3
Октадекан	254	112,0	33,2	33	2	47	183	0,006	0,005	2,5
Нонадекан	268	116,3	34,2	34	2	140	540	0,00004	0,00004	7
Ейкозан	282	121,8	35,4	35	2	60	244	0,0019	0,0015	3*
н-спирти										
Метанол	32	32,7	11,7	12,0	6,0	3	4	∞	17139,8	1
Етанол	46	27,9	10,4	10,5	3,5	4	5	∞	3719,3	1
Пропанол	60	24,8	9,3	10,0	2,5	5	6	∞	1142,7	1
Бутанол	74	35,3	12,9	12,5	2,5	8	18	63,2	63,8	2
Пентанол	88	39,3	13,8	15,0	2,5	10	22	22,0	20,9	2
Гексанол	102	55,0	18,7	17,5	2,5	12	26	5,9	8,3	2
Гептанол	116	60,9	20,2	20,0	2,5	18	60	1,07	0,81	2
Октанол	130	73,7	23,8	22,5	2,5	20	68	0,54	0,45	2
Нонанол	144	81,0	257	25,0	2,5	27	94	0,14	0,10	2,5
Деканол	158	90,9	28,3	27,5	2,5	36	128	0,037	0,027	3
Ундеканол	172	102,3	31,4	30,0	2,5	39	138	0,019	0,018	3
Додеканол	186	107,4	32,4	32,5	2,5	56	196	0,004	0,0034	4
Тридеканол	200	116,8	34,8	35,0	2,5	68	242	0,0014	0,0013	4,5
Тетрадеканол	214	125,0	36,7	37,5	2,5	96	342	0,0003	0,00028	6
Пентадеканол	228	133,3	38,7	40,0	2,5	84	305	0,0005	0,00046	5
Гексадеканол	242	137,6	39,5	42,5	2,5	144	520	0,00004	0,000041	8
Гептадеканол	256	144,0	40,9	45,0	2,5	209	759	0,00001	0,0000075	11
Октадеканол	270	152,0	42,7	47,5	2,5	340	1241	0,000001	0,0000008	17
Нонадеканол	284	157,7	43,8	50,0	2,5	336	1232	0,000001	0,0000008	16
Ейкозанол	298	162,1	44,6	52,5	2,5	308	1134	0,0000015	0,0000012	14

* – укорочені кластери: кластеризація не за місцем крайнього карбону.

Отримано кореляцію розрахованої розчинності у воді з довідковими даними [4] для н-алканів R=0,986 з середнім відхиленням 20 %, для н-спиртів R=0,999 з середнім відхиленням 15 %.

Незважаючи на значні відхилення вважаємо отриманий результат добрим, оскільки розчинність у воді для розглянутих гомологічних рядів змінюється на 7 порядків (навіть не враховуючи необмежену розчинність перших трьох н-спиртів). Для досягнення такого результату довелось змінити очікувану систему кластерів (відносно моделі для твердої речовини [20]). Для н-алканів до октану коефіцієнт кластеризації не змінився (К=2), а надалі його довелось збільшувати аж до К=9 для гексадекану. При цьому пропорційно збільшується еквівалентна довжина лінійного кластеру за участю молекул води n_{C+H2O}; у формулі (4) застосовано ступінь «3,40», що умовно описує об'єм, який займає кластер разом з асоційованими молекулами води. Для н-спиртів знадобилася ще більша корекція: зменшення кластеру до мономерів К=1 для легких спиртів та збільшення до К=17 для октадеканолу.

7. Обговорення результатів зміни властивостей у гомологічних рядах вуглеводнів

За результатами проведеного дослідження на підставі синхронності кривих виявлено параметри фізико-хімічних залежностей, які можна використовувати для взаємного прогнозування. На підставі осциляційності та ступінчастості деяких кривих зроблено припущення щодо кластерної будови речовини з різним принципом кластеризації різних представників гомологічного ряду вуглеводнів. У такому разі відповідні параметри речовини стають індикатором надмолекулярної будови, що дозволяє проводити її моделювання. Спираючись на таку методику отримано сім математичних виразів, які працюють з доброю кореляцією, для тестування працездатності різних принципів опису: за довжиною молекули (кількістю атомів карбону), за довжиною кластера, за часткою зростання довжини молекули (кластеру), з використанням взаємних кореляцій між параметрами. Основною відмінністю розробленого підходу є пошук шляхів для врахування надмолекулярної будови речовини. Для цього використовується показник легкості плавлення речовини, який враховує довжину та молярну масу модельованого кластеру. Довжина кластеру не завжди пропорційна довжині мономеру, а коефіцієнт кластеризації може різнитися для різних гомологів. Саме такий підхід стає більш чутливим до властивостей речовини, ніж базування розрахунків на параметрах мономерного стану.

У дослідженні проаналізовано динаміку змін фізичних та фізико-хімічних властивостей у гомологічних рядах вуглеводнів на прикладі н-алканів та н-спиртів: температур плавлення $t_{пл}$, кипіння $t_{кип}$, спалаху $t_{сп}$, самоспалахування $t_{сс}$, густина ρ, розчинність у воді γ, в'язкість ν, поверхневий натяг σ, теплота випаровування $H_{вип}$. Виявленню та аналізу підлягали вид залежностей – наявність лінійного або експоненційного характеру, а також їх аномалії – осциляційні, ступінчасті, одиночні відхилення від загальної залежності. Ці особливості потребують пояснення та способів врахування. На даний момент практичні розрахунки не враховують цих явищ.

Лінійний характер залежності у гомологічному ряду є пропорційним «арифметичним», накопичувальним властивостям речовини (приймемо їх за клас 1): кількості атомів карбону або каркасній довжині молекули, а також молярній масі

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

або стехіометричному коефіцієнту реакції горіння, але останні не завжди працюють для молекул ізомерної будови. Такі властивості речовин поводять себе так, нібито додаткова ланка наступного гомологу займає окреме індивідуальне місце у просторовій моделі формування відповідного показника. Залежності, наближені до лінійних також іноді виникають за умови накладання протилежних експоненційних ефектів (клас 2), які пропорційні зменшенню частки внеску «арифметичного» показника для наступного гомолога. З певними спрощеннями до цих класів можна залучити наступні залежності (рис. 3 та 4): клас 1) $t_{кип}$ та $H_{вип}$ спиртів; клас 2) $t_{сп}$ спиртів, ν та $H_{вип}$ алканів.

Залежності з експоненційним характером також можна поділити на 2 класи (рис. 3 та 4): клас 3) переважно експоненційні – $t_{сс}$ та γ спиртів, $t_{кип}$ та $t_{сп}$ алканів; клас 4) експоненційний характер з накладанням інших залежностей – $t_{пл}$, σ, ρ алканів та спиртів, $t_{сс}$ та γ алканів, ν спиртів. Скоріше за все ці залежності в першу чергу накладаються з лінійними, а у другу – з додатковими. Тобто властивості речовин з експоненційним характером зміни значень поводять себе так, наче додаткова ланка наступного гомологу не займає місця, але відповідний елемент стає важчим на певну частку.

Лінійні залежності (класи 1 та 2) з метою прогнозування можна описувати рівняннями виду y=ax+b. Так, для н-спиртів формула прогнозування теплоти випаровування за довжиною карбонового ланцюга (у якості «арифметичного» показника властивостей речовини) за формулою $H_{вип}$=37,3+4,75(n_C–1) кДж/моль забезпечує R=0,999 з середнім відхиленням 0,8 %. Замість n_C можна було використати інші «арифметичні» показники – молярну масу M або стехіометричний коефіцієнт реакції горіння β, які у одному гомологічному ряду мають однаковий шаг зміни, тоді у рівнянні y=ax+b зміниться складова «ax».

Практичні розрахунки часто ґрунтуються не на «арифметичних», а на експериментальних властивостях, які легко встановити, наприклад, $t_{кип}$ [1, 9], та теж дозволяють використовувати лінійні залежності. Але, як показують дані рис. 3 та рис. 4, жоден з параметрів не поводить себе абсолютно ідентично до інших, що робить неможливим такий підхід для точного прогнозування. Тим не менш, такі кореляції представляють інтерес як теоретичний, так й практичний.

Універсальні залежності, які дозволяють розраховувати властивості різних гомологічних класів мають більш складний характер та повинні враховувати принципову різницю між цими вуглеводнями. Так, для широкої номенклатури вуглеводнів розроблено формулу (2) для прогнозування $H_{вип}$ на підставі значень $t_{кип}$, M та коефіцієнту гомологічного ряду. Для добірки з 21 сполуки різних гомологічних рядів (алканів, спиртів, дієнів, фенолів, кетонів, гліколей, альдегідів, ароматичних та нітро- сполук нормальної та ізомерної будови) отримано R=0,996 з середнім відхиленням 1,3 кДж/моль.

Для деяких параметрів даний аналіз виявив наявність явища «парності-непарності» як чергування властивостей молекул з парною та непарною кількістю каркасних атомів. Найбільш чітко у всьому дослідженому діапазоні n_C=1–20 це простежується для $t_{пл}$ н-алканів та $t_{сп}$ н-спиртів. Для останніх ця залежність два рази змінює чергування осциляційності (тобто існує ще й ступінчастість): після 5 атомів карбону у молекулі (6 каркасних атомів, враховуючи оксиген) та перед 10 атомами (10 каркасних атомів, враховуючи оксиген), що може бути проявами «пентанового ефекту» або зміною точки кластеризації за довжиною карбонового ланцюга.

Для н-алканів суттєва коливальність на всьому дослідженому діапазоні дов-

жин молекул спостерігається лише для $t_{пл}$. Для інших параметрів певні відхилення від загальної тенденції залежності спостерігаються лише на частині обраного діапазону гомологічного ряду, а деякі мають цілком плавний характер, наприклад, $t_{кип}$ н-алканів. Також помітні відхилення не за принципом коливальності в області перших членів гомологічного ряду (до пропану або бутану) для ν, $H_{вип}$, ρ, σ, γ, $t_{кип}$, що можна також пов'язати з відсутністю «пентанового» ефекту, який буде певною мірою проявлятися у властивостях більш довгих вуглеводнів. Поясненням може також бути те, що починаючи з бутану різко збільшується кількість конформних конфігурацій молекули, тоді деякі з них виявляються у системі міжмолекулярної взаємодії більш короткими, відповідно, більш короткою стає усереднена довжина цих конформних конфігурацій. Також, різка зміна характеру залежності спостерігається для t_{cc} після n_C=5. Для γ, t_{cc} та незначно для в'язкості виникає ще одна область відхилень, які не передбачає тенденція цих залежностей, після n_C=15, що може бути пов'язано з виникненням глобулізації довгих молекул. В'язкість працює як опір текучості – розтягненню молекул, осциляційність на цьому відрізку говорить про те, що «парні» та «непарні» молекули глобулізуються по-різному. Звертає на себе увагу подібність графіків для t_{cc} та γ, що може свідчити про близькість надмолекулярної будови розчинів однакових молекул у воді та у повітрі – у вигляді водо- або пероксидвмісних кластерів. Такий самий ефект спостерігається й для н-спиртів. Між н-алканами та н-спиртами є ще одна аналогія: для t_{cc} починаючи з n_C=12 значення виявляються меншими за $t_{кип}$; тому випаровування в умовах досліджень відбувається за зменшеної температури відносно $t_{кип}$, тоді пара, що утворюється, може містити більшу частку кластерів.

Для н-спиртів з n_C<5 відсутні ефекти відхилень від тенденцій зміни графічних залежностей (крім $t_{пл}$ метанолу та етанолу, а також ρ та σ метанолу), що демонструє принципову різницю у будові речовини н-спиртів та н-алканів у рідкому стані. А графік $t_{пл}$ н-спиртів демонструє дивну подібність до графіку для н-алканів з R=0,996, причому аналіз за довжиною молекули не враховує групу ОН, наче за кластеризації у твердий стан вона є боковою; також відзначимо, що для метанолу та етанолу негативний ефект більш інтенсивний, ніж для метану та етану, що скоріше за все визначається їх більшою молярною масою. Значною коливальністю у всьому діапазоні досліджених значень n_C відзначаються ρ, ν, σ н-спиртів; незначну – має γ та t_{cc}. Обмежена розчинність у воді н-спиртів починається з н-бутанолу, причому якщо пропілгідроксильну групу прийняти як одну ланку карбонового ланцюга молекули, то відповідна залежність отримає близький характер до t_{cc}. Починаючи з n_C=14–16 помітні суттєві аномалії у залежностях для $H_{вип}$, ρ, γ, t_{cc}, $t_{сп}$, $t_{кип}$. Для перших трьох параметрів це можна пояснити тим, що $t_{кип}$ відповідних н-спиртів є більшою за стандартну. Тобто, відповідні параметри наведено для підвищених температур. З іншого боку можливі явища глобулізації довгих молекул. Примітним також є те, що деякі параметри повторюють профіль іншого параметру на частині обраного діапазону довжин карбонового ланцюга, як, наприклад, $t_{кип}$ та $t_{сп}$ для «довгих» спиртів. Подібними також є залежності для ρ та σ: завищене значення відносно тенденції графіків для метанолу, негативний ефект залежностей після тридеканолу (для поверхневого натягу для побудови цільної залежності не вистачило даних, але, наприклад, для гексадеканолу σ=0,0285 Н/м більша σ=0,0295 Н/м ніж для додеканолу). Виникає припущення, що деякі властивості н-спиртів визначаються лише довжиною карбонового ланцюга, а деякі – довжиною карбоново-гідроксильного ланцюга, тобто корелюють з більш довгим ланцюгом на «1», ніж карбоновий.

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

Враховуючи наявність у спиртів гідроксильної групи говорять про їх схильність до асоціації з утворенням надмолекулярної будови за рахунок водневого зв'язку. Так, у гептанолі встановлено наявність димерів, тримерів, тетрамерів [6]. Можливо, різні властивості визначаються наявністю найменшого, найбільшого або усередненого кластеру. Так, для багатьох властивостей, пов'язаних з випаровуванням, формування певного параметру визначається існуванням найменшого кластеру. Так само у розрахунку $t_{сп}$ неазеотропних сумішей взаєморозчинних рідин за малих (до 5 %) домішок важкокиплячого компоненту $t_{сп}$ не підвищується. Для більшого вмісту висококиплячої рідини застосовують залежність її внеску від частки вмісту [1]. Аналогічно, якщо у рідині на даний момент присутні кластери з різним координаційним числом, то на властивості рідини буде створювати більший вплив наявність найменших (легкокиплячих) кластерів. Таким чином, деякі параметри речовини можливо прогнозувати за даними щодо молекулярного рівня організації речовини, а для інших – надмолекулярного рівня.

Існує температура переходу кристалічної будови речовини $t_{тр}$, яка для алканів збігається або є трохи більшою за $t_{пл}$ [5], графік залежності для н-алканів виявляється менш коливальним. Тобто відбувається уніфікація структур надмолекулярної будови. Оскільки не спостерігається різкої зміни інтенсивності випаровування можна вважати, що у цей момент кластерна будова зберіглася. Для сумішей кластерів за збільшення температури від плавлення до кипіння працює їх усереднена еквівалентна довжина з поступовим збільшенням частки кластерів з меншим координаційним числом або мономерів, що працює на зменшення амплітуди пульсацій значень характерних температур у гомологічному ряду. Так, для залежності $t_{сп}$ пульсації помітні, але у меншому ступені ніж для $t_{пл}$ та без аномалій для перших членів гомологічного ряду.

За даними проведеного аналізу найбільш чітко вплив кластерної будови речовини проявляється в осциляційності залежності для $t_{пл}$ алканів та спиртів. Тому на підставі попередньо проведених досліджень [10, 20] розроблено формулу (3), яка описує зміну $t_{пл}$ вуглеводнів на базі розробленого показника легкості плавлення n_M, який залежить від еквівалентної довжини та молярної маси кластеру. Формула (3) описує $t_{пл}$ н-алканів та н-спиртів у діапазоні довжин карбонового ланцюга n_C=1–20 та n_M=13–165 з R^2=0,9997.

Головною складністю користування формулою (3) для прогнозування $t_{пл}$ є невідомість структурних особливостей кластеру, які необхідно врахувати для визначення його довжини та показника n_M. Тоді іншим практичним напрямком її використання стає можливість оцінювати структурні особливості кластеру за умови проведення розрахунку у зворотному напрямку.

Також розглянуто модель водорозчинності речовини γ на основі принципів кластерної будови: враховано очікувану довжину водовуглеводневого кластеру, кількість асоційованих молекул води, молярну масу мономеру вуглеводню. Розроблено формулу (4), яка працює за допомогою даних табл.1, що дозволяє прогнозувати γ масиву з 40 сполук н-алканів та н-спиртів з R=0,99 та середнім відхиленням 20 %, що є непоганим результатом, оскільки γ змінюється на 7 порядків. Наявність межі розчинності говорить про зв'язування усієї маси води у міцелоподібні структури даною кількістю розчиненої речовини. Подібність графіків зміни γ для н-алканів та н-спиртів та $t_{сс}$ свідчить про подібність надмолекулярних структур за умови асоціації вуглеводню у кластери з водою або з киснем повітря. Тоді процеси ініціації виникнення горіння у вигляді кластерних надмолекулярних

утворень пероксидного типу можна описати процесами розчинності. У випадку самоспалахування можна розглянути модель пероксидної розчинності газоподібного стану вуглеводню у повітрі.

У даній роботі показано, що деякі відхилення у залежностях зміни певних параметрів у гомологічних рядах вуглеводнів визначаються відмінностями у їх кластерній будові: утворення різними вуглеводнями кластерів з різним координаційним числом, кластерів з різним місцем кластеризації двох молекул за довжиною вуглеводню за принципом «парних-непарних» молекул, глобулізацією довгих молекул вуглеводнів. Тоді визначальним параметром властивостей речовини обрано еквівалентну довжину кластеру з використанням у якості коригуючого параметру молярної маси молекули або кластеру, що використано у формулах (3) та (4).

Але під час моделювання за розробленою методикою є умовний момент, який полягає у тому, що модель будови кластеру базується на першому припущенні, яке працює для певного члена гомологічного ряду вуглеводнів. Тоді усі інші моделі кластерів відштовхуються від цієї схеми. Також залишились остаточно не встановленими причини формування лінійних або експоненційних профілей залежностей, кореляція певних показників н-спиртів з довжиною карбонового або карбоново-гідроксильного ланцюга, що потребує подальших досліджень. Проведені дослідження та встановлені розрахункові залежності валідні у межах n_C=1–20 для н-алканів та н-спиртів та може бути досліджено їх поширення на інші гомологічні класи вуглеводнів. Уточненню підлягає методика оцінки будови та довжини кластеру; потребує розширення номенклатурна та кількісна база сполук для підтвердження працездатності універсальної формули (2), яка прогнозує $H_{вип}$.

У подальшому передбачається провести розширене прогнозування обраних параметрів властивостей речовини за розробленими принципами, у тому числі параметрів пожежної небезпеки, для розширеної номенклатури гомологічних класів вуглеводнів. Моделювання надмолекулярної будови при цьому буде мати індивідуальні особливості, як для кожного гомологічного класу, так і всередині цих класів, що характеризується умовністю внаслідок неможливості перевірки моделі кластерів навіть на рівні сучасних методів досліджень речовини.

8. Висновки

1. Виділено 6 рівнів властивостей речовини, які послідовно формують певні параметри, що визначають пожежну небезпеку речовини: 1) вихідні умови середовища, атомарний склад речовини; 2) спосіб організації атомів у молекулу; 3) спосіб організації молекул у надмолекулярну структуру; 4) властивості, пов’язані з фізичним та хімічним станом, а також з їх зміною; 5) критичні та рівноважні умови процесу горіння; 6) результуючі параметри, які визначають виникнення пожежної небезпеки та поширення горіння. Параметри попередніх рівнів можуть бути використані для визначення параметрів наступних рівнів. Параметри речовини поділено на «арифметичні», які пропорційні атомарному складу та мають чітку дискретність значень (рівень 1), та експериментальні, які не мають можливості простого розрахунку та чіткої дискретності. Тоді «арифметичні» показники (кількість каркасних атомів, стехіометричний коефіцієнт реакції горіння, молярна маса) визначено як зручні для калібрування інших властивостей шляхом врахування їх абсолютного зростання або у частках. Але серед них лише кількість каркасних атомів є гнучким показником, який може відбивати зміни у будові молекули або кластеру.

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

2. Проведений аналіз зміни властивостей у гомологічних рядах н-алканів та н-спиртів показав, що жоден з параметрів речовини не поводить себе повністю ідентично до іншого, тому типові розрахунки, наприклад, температури спалаху за значенням температури кипіння, мають системну похибку. Крім того, переважна більшість залежностей для властивостей вуглеводнів має суттєві аномалії у логічній послідовності зміни даного показника у вигляді коливальності, ступінчастості, одиночних пульсацій, «негативних» ефектів (зміна напрямку залежності). Деякі з цих аномалій можна описати у разі врахування глобулізації довгих молекул (як зміна їх еквівалентної довжини) та кластерної будови речовини, яка відрізняється для «парних» та «непарних» молекул внаслідок чергування принципів кластеризації. Визначальним параметром властивостей речовини обрано еквівалентну довжину кластеру з використанням у якості коригуючого параметру молярної маси. Класифіковано залежності зміни властивостей на лінійні та експоненційні, та на прикладі деяких залежностей показано можливість їх апроксимації відносно «арифметичних» показників. Апроксимація теплоти випаровування за окремими формулами для н-алканів та н-спиртів від кількості атомів карбону у молекулі для n_C=1–20 дала R=0,999. Розроблено універсальну формулу (2) на прикладі представників 10 гомологічних рядів, яка прогнозує теплоту випаровування з R=0,996 та середнім відхиленням 1,3 кДж/моль. За часткою зростання довжини молекули у ряду н-алканів апроксимовано залежності для температур кипіння та спалаху з R=0,999. Розроблено універсальну залежність (3) для прогнозування температур плавлення вуглеводнів різних гомологічних рядів на підставі визначення будови, еквівалентної довжини кластерів та їх молярної маси, яка для н-алканів та н-спиртів з n_C=1–20 забезпечує R^2=0,9997. З використанням таких самих «арифметичних» показників кластерної будови розроблено формулу (4), яка прогнозує розчинність у воді н-алканів та н-спиртів з R=0,99 та середнім відхиленням 20 %, що є непоганим результатом, оскільки розчинність змінюється на 7 порядків.

Література

1. Rowley J. R. Flammability Limits, Flash Points, and Their Consanguinity: Critical Analysis, Experimental Exploration, and Prediction: A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy / Brigham Young University. Provo, 2010. 252 p. URL: http://hdl.lib.byu.edu/1877/etd3661

2. Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення: ДСТУ 8829:2019. [Чинний з 01.01.2020]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. 75 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf

3. Search for species data by chemical name. NIST Chemistry WebBook. U. S. Department of Commerce. doi: 10.18434/T4D303

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

5. 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

6. 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

7. Millet D. B., Baasandorj M., Farmer D. K., Thornton J. A., Baumann K.,

Brophy P., Xu J. Millet D. B. Sources and sinks of atmospheric formic acid. Atmos. Chem. Phys. 2015. № 15. P. 6283–6304. doi: 10.5194/acp-15-6283-2015

8. 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 Science. 2017. Vol. 60. P. 1–25. doi: 10.1016/ j.pecs.2016.12.001

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

10. 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

11. Трегубов Д. Г. Концентраційні характеристики виникнення горіння на підставі пероксидної теорії. Пожежна безпека. 2022. № 41. С. 110–118. doi: 10.32447/20786662.41.2022.13

12. Трегубов Д. Г., Трефілова Л. М. Нелінійність зміни параметрів пожежної небезпеки у гомологічному ряду н-алканів. III International Scientific and Theoretical Conference «Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements». Stockholm, Kingdom of Sweden: ICSR. 2023. P. 40–43. doi: 10.36074/scientia-28.04.2023

13. Weiss, C. K., Toca-Herrera J. L. Colloid Chemistry. Bingen: University of Applied Sciences, 2018. 232 p. doi: 10.3390/gels4030064

14. 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. Phys. Chem. Chem. Phys. 2021. № 23. P. 1956–1966. doi: 10.1039/d0cp05503d

15. Yaxin A., Karteek K. B., Sanket A. D. Development of new transferable coarse-grained models of hydrocarbons. J. Phys. Chem. 2018. Vol. 28. № 122. P. 7143–7153. doi: 10.1021/acs.jpcb.8b03822

16. 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

17. 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. Physical Chemistry Chemical Physics. 2021. № 23(11). P. 6763–6774. doi: 10.1039/D1CP00032B

18. 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

19. 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

20. 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

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

D. Tregubov, *PhD, Associate Professor, Doctoral Student*
L. Trefilova, *DSc, Senior Researcher, Professor of the Department*
E. Slepuzhnikov, *PhD, Associate Professor, Head of the Department*
D. Sokolov, *PhD, Associate Professor, Teacher of the Department*
F. Trehubova, *Student*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

CORRELATION OF PROPERTIES IN HYDROCARBONS HOMOLOGOUS SERIES

Correlations between combustible substances properties in the homologous series of n-alkanes and n-alcohols with a length of n_C=1–20 were studied in order to determine ways to increase the methods convergence for assessing fire hazard parameters. The cluster length was added to the substance modulating parameters set. It should be noted that substances properties are often predicted using a molecule coarse-grained model, which has discreteness, does not describe short molecules, and requires an individual approach. It is shown that there are substance "arithmetic" parameters that directly depend on the certain atoms number. Among them, "length" better reflects isomeric, conformal, cluster differences, which are associated with parameters anomalies of hydrocarbons. A vaporization heat linear description from n_C separately for n-alkanes and n-alcohols gives R=0,999. Exponential approximation of the n-alkanes boiling point t_{bp} and flash point t_{fp} by n_C change fractions has R=0,999. It is shown that there is a correlation between t_{fp} and t_{bp}, but with a systematic difference, which indicates that the cluster composition is not completely similar at these temperatures; between t_{fp} and t_{mp} there is a smaller correlation, but its presence indicates clusters partial similarity. A universal formula for predicting hydrocarbons vaporization heats of 10 homologous series has been created, which has R=0,996. The description change hydrocarbons pulsations of in t_{mp} was carried out on the cluster schemes alternation basis in homologous series, as well as taking into account their length and molar mass, which gives R=0,9997. According to similar principles, a formula for the hydrocarbons solubility in the water has been developed, which has the satisfactory accuracy. The study showed that the cluster length is a determining factor by which substance properties are modulated.

Keywords: hydrocarbons, density, viscosity, surface tension, water solubility, characteristic temperatures, cluster, fire hazard

References

1. Rowley, J. R. (2010). Flammability Limits, Flash Points, and Their Consanguinity: Critical Analysis, Experimental Exploration, and Prediction. A dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Provo: Brigham Young University. Available at: http://hdl.lib.byu.edu/1877/etd3661

2. Pozhezhovybukhonebezpechnist′ rechovyn i materialiv. Nomenklatura pokaznykiv i metody yikhn′oho vyznachennya. (2020). DSTU 8829:2019 from 01.01.2020. Kyyiv: DP «UkrNDNTS» Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_8828_2019.pdf

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

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

5. 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

6. 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

7. Millet, D. B., Baasandorj, M., Farmer, D. K., Thornton, J. A., Baumann, K., Brophy, P., Xu, J. (2015). Sources and sinks of atmospheric formic acid. Atmos. Chem.

Phys, 15, 6283–6304. doi: 10.5194/acp-15-6283-2015

8. 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

9. 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

10. Tregubov, D., Sharshanov, A., Sokolov, D., Trehubova, 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

11. Tregubov, D. G. (2022). Combustion concentration characteristics on the peroxide theory basis. Fire Safety, 41, 110–118. doi: 10.32447/20786662.41.2022.13

12. Trehubov, D. H., Trefilova, L. M. (2023). Neliniynist′ zminy parametriv pozhezhnoyi nebezpeky u homolohichnomu ryadu n-alkaniv. III International Scientific and Theoretical Conference «Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements». Stockholm, Kingdom of Sweden. doi: 10.36074/scientia-28.04.2023

13. Weiss, C. K., Toca-Herrera, J. L. (2018). Colloid Chemistry. Bingen: University of Applied Sciences. doi: 10.3390/gels4030064

14. 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

15. 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

16. 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

17. 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

18. 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

19. 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

20. 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

Надійшла до редколегії: 18.09.2023
Прийнята до друку: 09.11.2023

 © Д. Г. Трегубов, Л. М. Трефілова, Є. Д. Слепужніков, Д. Л. Соколов та ін.

УДК 614.84

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

МОДЕЛЬ ВИПРОМІНЮЮЧОЇ ПОВЕРХНІ ПОЛУМ'Я НАД РОЗЛИВОМ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ В УМОВАХ ВІТРУ

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в розливі, а предметом дослідження – геометричні характеристики полум'я, зокрема, його довжина і кут нахилу. Визначено геометрію випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини за умови довільної форми розливу і з урахуванням вітрового впливу на форму полум'я. Побудовано модель випромінюючої поверхні полум'я над розливом рідини довільної форми, що горить. Суть підходу полягає в тому, що довжина полум'я у заданій точці дорівнює довжині полум'я у точці кругового розливу, розташованій на тій самій відстані від межі розливу. Це дозволяє узагальнити відомі вигорання рідини. Для врахування впливу вітру на форму факела використовується емпіричні залежності на випадок розливу довільної форми. При цьому довжина полум'я є степеневою функцією відносно відстані до межі розливу і питомої масової швидкості емпірична залежність довжини і кута нахилу полум'я від швидкості вітру. Припускається, що вітер деформує полум'я таким чином, що всі точки поверхні полум'я відхиляються на однаковий кут від вертикалі. Чим меншими є розміри розливу та питома масова швидкість вигорання рідини, тим сильніше вітер відхиляє полум'я від вертикальної осі. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі. Отримані з моделі результати добре узгоджуються з експериментальними. Відносна похибка для кута відхилення полум'я вітром від вертикальної осі не перевищує 9 %. На практиці це відкриває можливості для розрахунку теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти, а також визначення безпечних зон для розташування особового складу та техніки, задіяних у ліквідації пожежі. Модель може бути використана для уточнення теплового впливу пожежі на сталеві і бетонні конструкції.

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

1. Вступ

Підприємства хімічної промисловості мають тенденцію до укрупнення, що ще більше підвищує концентрацію небезпечних хімічних речовини на відносно невеликій площі. Незважаючи на заходи безпеки, що вживаються у виробництві, зберіганні та транспортуванні, великі аварії все одно трапляються. Однією з важливих причин великих аварій є «ефект доміно» [1]. Згідно зі статистичними даними [2], де були досліджено аварії за понад 50 років, «ефект доміно» найчастіше траплявся із скрапленим газом, нафтою і нафтопродуктами. Аварії відбувалися на технологічних установках (38,5 %), складах (33 %), при транспортуванні (10,6 %). Пожежі горючих рідин є одним із домінуючих сценаріїв розвитку (42 %) при аваріях на промисловості. Крім того, серед надзвичайних ситуацій, пов'язаних з пожежами, близько 60 % займають пожежі горючих рідин [3]. Особливу небезпеку являє тепловий потік на сусідні технологічні об'єкти. Нагрів сталевих конструкцій резервуарів до температури самоспалахування горючої рідини, що в них зберігається, здатен призвести до вибуху парів рідини в газовому просторі резервуара або до горіння парів на виході з дихальних пристроїв. Перший випадок має місце, якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара знаходиться між нижньою і верхньою концентраційними межами розповсюдження полум'я. Другий випадок – якщо концентрація парів в газовому просторі резервуара перевищує верхню концентраційну межу роз-

повсюдження полум'я. Такий ланцюжок подій здатен призвести до каскадного розповсюдження пожежі на підприємствах хімічної та переробної промисловості [4]. В [5] відзначається, що 44 % аварій, для яких мав місце «ефект доміно», починалися з пожежі рідини. Такі пожежі можуть відбуватися як в резервуарах, так і на поверхні землі внаслідок розливу рідини. При цьому значна кількість аварій починається саме з розливу рідини [6]. Вплив пожежі рідини на обладнання та персонал, що знаходиться поблизу, залежить від низки факторів, зокрема, властивостей рідини, що горить, розмірів дзеркала рідини, відстані до сусідніх об'єктів тощо. Для планування заходів, які б дозволили локалізувати аварію і запобігти її каскадному розповсюдженню, необхідно оцінити час, протягом якого температура сусідніх з пожежею об'єктів може досягти небезпечних значень.

Отже, проблемою є каскадне розповсюдження пожежі, викликане її тепловим впливом на сусідні технологічні об'єкти.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [7] наведено огляд масштабних аварій, пов'язаних з розливом горючих рідин. Розглянуто емпіричні і напівемпіричні моделі розтікання рідини на воді і на твердій поверхні. Але моделі горіння рідини і тепловий вплив пожежі на сусідні об'єкти залишено поза увагою.

В [8] розглянуто залежність висоти полум'я в циліндричному резервуарі від його діаметру та висоти стінок над рівнем нафтопродукту. Досліджено з'єднання полум'я при горінні в двох сусідніх резервуарах. При цьому горіння розливу горючої рідини залишено поза увагою. В [9] досліджується взаємодія «полум'я-полум'я» для двох прямокутних осередків горіння. Отримано емпіричні залежності для висоти об'єднаного полум'я, але форма факела і вплив вітру на нього не розглянуто.

В [10] експериментально досліджено геометрію полум'я лінійного осередку горіння та променевого теплового потоку від нього на похилу поверхню. Але інші форми осередку горіння і вплив вітру на процес горіння залишаються нерозглянутими. В [11] наведено огляд моделей, що описують горіння нафтопродуктів у резервуарах зі стінками певної висоти над поверхнею рідини. Розглянуто граничні умови, які суттєво впливають на процес теплообміну та швидкість горіння, наприклад, розміри басейна, швидкість вітру тощо. Але горіння рідини в розливі довільної форми залишається не дослідженим. В [12] наведено огляд досліджень стосовно горіння нафтопродуктів в басейнах. Розглянуто пульсації полум'я, питому масову швидкість вигорання, висоту полум'я, теплопередачу випромінюванням. Але суттєвим обмеженням цих досліджень є умова відсутності вітру.

В [13] досліджується вплив вітру на питому масову швидкість вигорання на відкритому просторі і в тунелях. Відзначено, що залежність питомої масової швидкості вигорання від діаметра осередку горіння і швидкості вітру носить складний характер. Наприклад, можливі ситуації, коли збільшення швидкості вітру призводить до зменшення питомої масової швидкості вигорання. Але вплив вітру на висоту і кут нахилу полум'я в роботі не розглядаються. В [14] за допомогою FDS (Fire Dynamics Simulator) моделювався вплив швидкості вітру на питому масову швидкість вигорання гептану. Показано, що при невеликих розмірах осередку горіння (менше 1 м) наявність вітру збільшує питому масову швидкість вигорання в кілька разів. При збільшенні розмірів осередку горіння вплив швидкос-

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

ті вітру зменшується, і при розмірах осередку горіння більше 1,5 м питома масова швидкість вигорання гептану збільшується не більше ніж на 30 %. Але вплив швидкості вітру на геометрію полум'я не досліджено. В [15] на основі експериментальних досліджень побудовано кореляційну залежність швидкості вигорання палива від діаметру басейну, теплота кипіння рідини, ступеня чорноти полум'я. Втім, геометричну форма факела в роботі не розглянуто.

В [16] проаналізовано низку досліджень, в яких було отримано залежність довжини полум'я від діаметра осередку горіння у вигляді:

$$L = aD\left(\frac{\eta}{\rho_a\sqrt{gD}}\right)^n, \qquad (1)$$

де L – довжина факела; D – діаметр осередку горіння; η – питома масова швидкість вигорання; ρ_a – густина повітря; g – прискорення вільного падіння; a>0, n>0 – сталі, які залежать від особливостей проведення експерименту. Формула (1) може бути застосована до розливів рідини, що мають форму наближену до кола, але у випадку, коди форма розливу суттєво відрізняється від кола, використання (1) є ускладненим.

В [17] побудовано модель горіння і гасіння рідини, що розтікається на горизонтальній поверхні і має форму кола. Але така ситуація є ідеалізованою: навіть незначний нахил поверхні призводить до витягування області розливу вздовж напрямку нахилу [18]. В [18] також враховано просочення рідини вглиб ґрунту, а в [19] наведено процедуру експериментального визначення параметрів просочення. Але параметри полум'я над рідиною, що горить і розтікається не розглянуто. В [20] побудовано модель конвекційної складової теплового потоку від пожежі розливу довільної форми, але променева складова теплового потоку, яка є переважаючою, в роботі не розглянута.

В [21] розглянуто тепловий вплив пожежі на сталеві конструкції, але поза увагою залишено параметри осередку горіння та динаміку їх зміни. В [22] побудовано модель теплового впливу пожежі розливу горючої рідини на сусідній резервуар з нафтопродуктом. Модель враховує теплопередачу випромінюванням та конвекцією. При цьому для визначення теплового потоку шляхом випромінювання критично важливою є інформація про форму і висоту полум'я над розливом. Те саме стосується і [23], де розглянуто охолодження водними струменями резервуара, що нагрівається під тепловим впливом пожежі, але і тут випромінююча поверхня полум'я припускається заданою апріорі.

Таким чином, розрахунок теплового потоку від пожежі розливу горючої рідини потребує визначення геометричної форми факела. При цьому форма факела залежить від форми розливу, типу рідини, напряму і швидкості вітру. Все це дає підстави стверджувати, що невирішеною частиною проблеми є створення моделі випромінюючої поверхні факела над розливом горючої рідини довільної форми.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є визначення геометрії випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини за умови довільної форми розливу і з урахуванням вітрового впливу на форму полум'я. На практиці це відкриває можливості для розрахунку теплового впливу на сусідні технологічні об'єкти, а також визначення

безпечних зон для розташування особового складу та техніки, задіяних у ліквідації пожежі.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

– побудувати модель випромінюючої поверхні факела над розливом рідини довільної форми за умови відсутності вітру;

– побудувати модель впливу вітру на форму полум'я;

– побудувати модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в розливі, а предметом дослідження – геометричні характеристики полум'я, зокрема, його довжина і кут нахилу. Основна гіпотеза дослідження – довжина полум'я над розливом горючої рідини визначається її питомою масовою швидкістю вигорання, формою і площею розливу та швидкістю вітру.

Основними припущеннями є:

– довжина полум'я над певною точкою розливу довільної форми дорівнює довжині полум'я над точкою кругового розливу, яка лежить на тій самій відстані від межі розливу;

– кут нахилу полум'я під впливом вітру над розливом довільної форми дорівнює куту нахилу полум'я над круговим розливом з тією самою площею.

Визначення геометричних параметрів випромінюючої поверхні полум'я спирається на емпіричні формули, що описують залежність довжини та кута нахилу полум'я від питомої масової швидкості вигорання, швидкості вітру і діаметра розливу за умови, що розлив має форму кола. Для побудови моделі випромінюючої поверхні полум'я в параметричній формі використовуються методи диференціальної геометрії. Для проведення розрахунків використовувалося середовище Delphi (Community Edition). Моделювання проводилося на прикладі сирої нафти, бензину, мазуту, трансформаторного масла, що розтікаються на поверхні ґрунту (гідравлічна провідність ґрунту $K=1{,}68\cdot10^{-7}$ м/с; показник капілярності $h_f=0{,}95$ м; пористість $\phi=0{,}31$).

5. Результати моделювання випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини

5.1. Побудова моделі випромінюючої поверхні факела за умови відсутності вітру

Аналіз виразу (1) свідчить, що довжина факела збільшується із зростанням величини питомої масової швидкості вигорання і діаметра розливу. Формула (1) має місце для розливів у формі кола або близьких до неї. Якщо ж форма розливу істотно відрізняється від кола (наприклад, має витягнуту форму, як при розтіканні на похилій поверхні), то формула (1) не може бути застосована.

Розглядаючи довільну форму розливу будемо вважати, що довжина полум'я у довільній точці (x,y) розливу описується виразом:

$$L(x,y)=2br(x,y)\left(\frac{\eta}{\rho_a\sqrt{2gr(x,y)}}\right)^n, \qquad (2)$$

де r(x, y) – відстань від точки (x, y) до межі області розливу Ω (рис. 1).

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

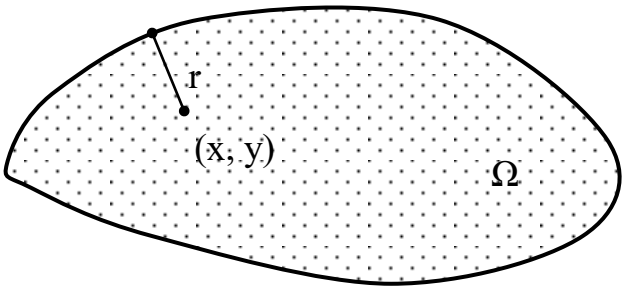


Рис. 1. До визначення довжини полум'я у точці (x, y) розливу як функції відстані до межі розливу

Виносячи r(x, y) і скорочуючи, отримаємо:

$$L(x,y) = 2b\left(\frac{1}{\rho_a\sqrt{2g}}\right)^n r^{1-n/2}(x,y)\eta^n.$$

Підставляючи в останній вираз значення для густини повітря ρ_a=1,29 кг/м^3, прискорення вільного падіння g=9,8 м^2/с, отримаємо формулу для довжини полум'я у довільній точці (x, y) розливу:

$$L(x,y) = b0{,}175^n r^{1-n/2}(x,y)\eta^n. \quad (3)$$

Для того частинного випадку, коли розлив має форму кола, вертикальний переріз полум'я, що проходить через діаметр розливу, буде мати вигляд, як на рис. 2, де b=55; n=0,67 [24].

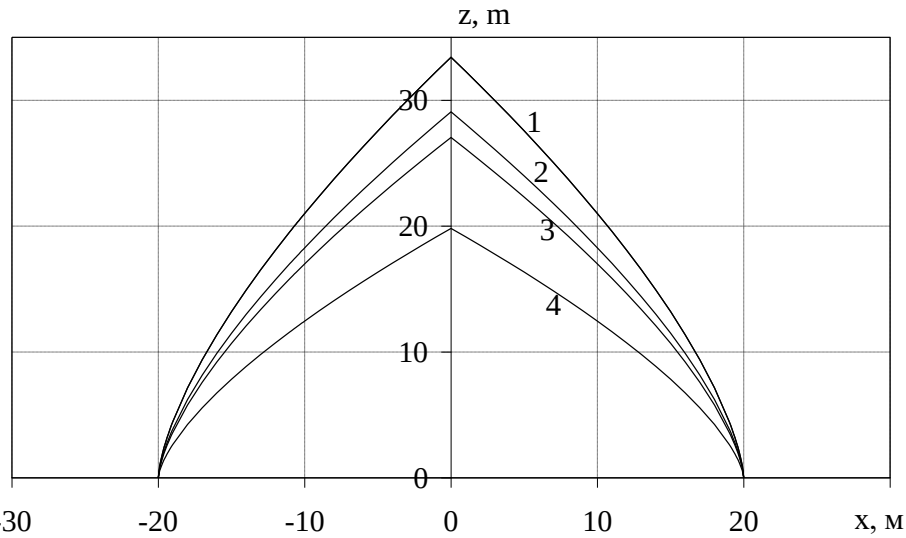


Рис. 2. Вертикальний переріз факела, що проходить через діаметр, над розливом у формі кола: 1 – бензин, η=0,048 кг/(м^2·с); 2 – трансформаторне масло, η=0,039 кг/(м^2·с); 3 – мазут, η=0,035 кг/(м^2·с); 4 – нафта, η=0,022 кг/(м^2·с)

Форма факела над круговим розливом близька до конічної, а довжина полум'я зменшується із зменшенням питомої масової швидкості вигорання.

5.2. Побудова моделі впливу вітру на форму полум'я

Наявність вітру призводить до нахилу факела. Залежність довжини факела L і

кута нахилу α (відхилення від вертикальної осі) від швидкості вітру має вигляд [24]:

$$L = bD\left(\frac{\eta}{\rho_a\sqrt{gD}}\right)^n \left(w^*\right)^{-0,21}; \tag{4}$$

$$\cos\alpha = \left(w^*\right)^{-0,5}, \tag{5}$$

де w^* – безрозмірна швидкість вітру:

$$w^* = \max\left\{1,\ w\left(\frac{g\eta D}{\rho_a}\right)^{-1/3}\right\}. \tag{6}$$

На рис. 3 проілюстровано залежність безрозмірної швидкості вітру w^* від діаметра розливу D для різних типів горючих рідин (бензин, η=0,048 кг/(м^2·с); мазут, η=0,035 кг/(м^2·с); нафта, η=0,022 кг/(м^2·с)) і різних значень швидкості вітру w.

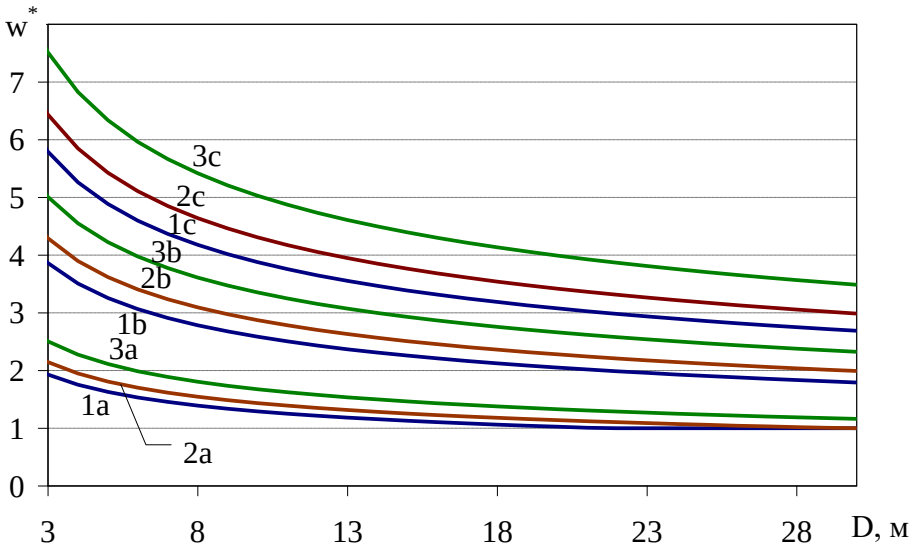


Рис. 3. Залежність безрозмірної швидкості вітру від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; a – w=2 м/с; b – w=4 м/с; c – w=6 м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 3 свідчить, що безрозмірна швидкість вітру зменшується із збільшенням діаметру розливу і інтенсивності вигорання рідини. Безрозмірна швидкість вітру монотонно спадає із ростом добутку цих параметрів, прямуючи до свого мінімально можливого значення u^*_{min}=1. Це значення досягається при:

$$\eta D \geq \frac{\rho_a w^3}{g}.$$

На рис. 4 проілюстровано вплив діаметра розливу, типу рідини і швидкості вітру на кут нахилу полум'я.

На рис. 5 показано залежність відносної довжини факела від діаметра розливу, типу рідини і швидкості вітру. Відносною довжина – відношення довжини фа-

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

кела L при даному значені швидкості вітру до довжини факела L_0 при тих самих умовах, але без вітру: L/L_0.

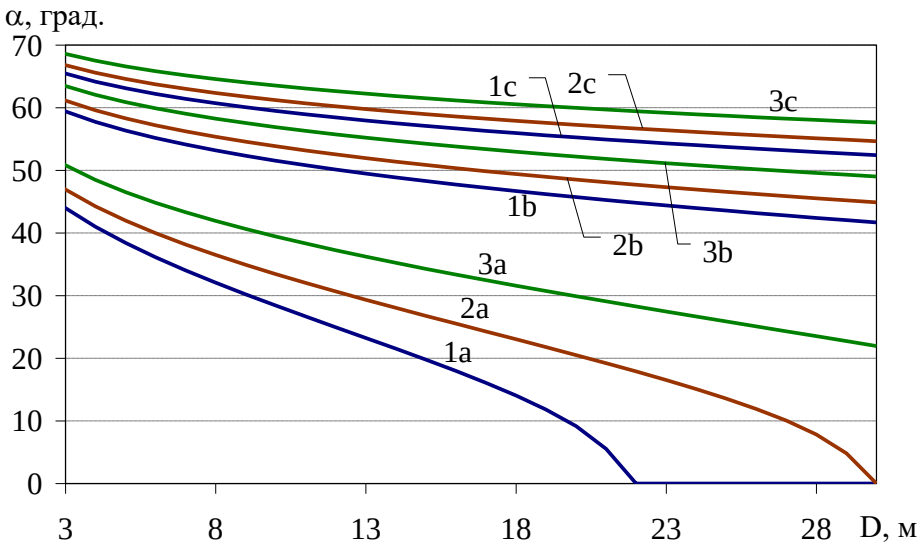


Рис. 4. Залежність кута нахилу від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; a – w=2 м/с; b – w=4 м/с; c – w=6 м/с

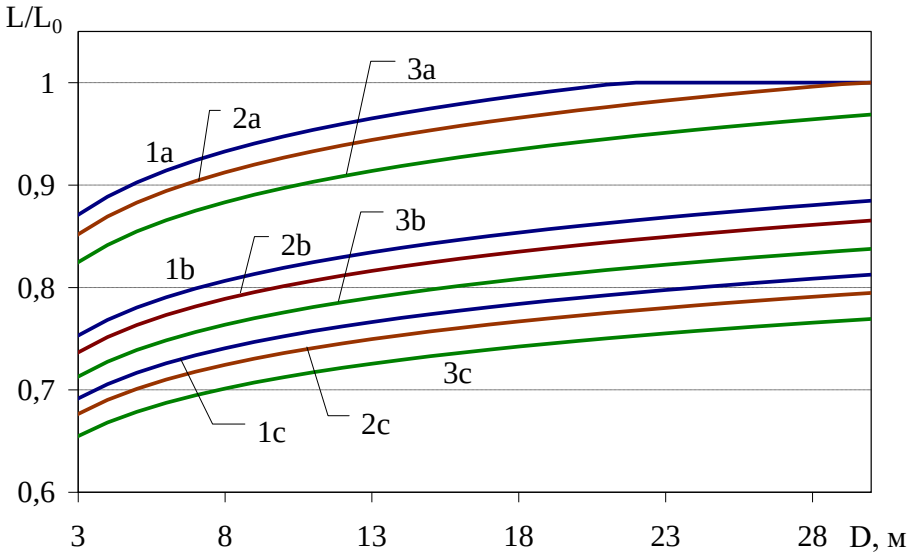


Рис. 5. Залежність відносної довжини факела від діаметра розливу: 1 – бензин; 2 – мазут; 3 – нафта; a – w=2 м/с; b – w=4 м/с; c – w=6 м/с

Аналіз графічних залежностей, наведених на рис. 4, 5 свідчить про зменшення впливу швидкості вітру на геометричні параметри факела (довжину полум'я і кут його нахилу) із збільшенням діаметру розливу і питомої масової швидкості вигорання.

Для розливу довільної форми будемо вважати, що мають місце залежності (4)–(6), де ефективний діаметр розливу D обчислюється за допомогою:

$$D = 2\sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

де S – площа розливу.

Тоді вираз (3) для довжини полум'я в довільній точці (x, y) розливу трансформується у:

$$L(x,y) = b0{,}175^{n} r^{1-n/2}(x,y)\eta^{n}\left(w^{*}\right)^{-0,21}, \tag{7}$$

де безрозмірна швидкість вітру обчислюється за формулою:

$$w^{*} = \max\left\{1,\ w\left(\frac{2g\eta\sqrt{S}}{\rho_a\sqrt{\pi}}\right)^{-1/3}\right\} \approx \max\left\{1,\ w\left(8{,}57\eta\sqrt{S}\right)^{-1/3}\right\}, \tag{8}$$

де проведено підстановку значень для прискорення вільного падіння і густини повітря. Із формули (8) випливає, що вітер буде відхиляти полум'я від вертикалі, якщо для його швидкості виконано нерівність:

$$w > \left(8{,}57\eta\sqrt{S}\right)^{1/3}. \tag{9}$$

Підстановка значень b=55; n=0,67 [24] в (7) дає:

$$L(x,y) = 17r^{0,67}(x,y)\eta^{0,67}\left(w^{*}\right)^{-0,21}. \tag{10}$$

Отже, залежність (10) описує довжину факела над розливом у довільній точці (x,y) в умовах вітру.

5.3. Побудова моделі випромінюючої поверхні факела в параметричній формі

За умови відсутності вітру довжина полум'я над точкою (u,v) розливу Ω визначається формулою (3). Тоді точці (u,v) на поверхні розливу відповідає точка (x,y,z) на випромінюючій поверхні полум'я:

$$\begin{cases} x = u, \\ y = v, \\ z = z_0, \end{cases}$$

де – довжина полум'я над точкою (u, v). Скорочення довжини полум'я і його нахил вітром (формули (4), (5) відповідно) призводить до того, що точці (u,v) на поверхні розливу відповідає точка (x,y,z):

$$\begin{cases} x = u + z_0 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\varphi, \\ y = v + z_0 \cdot \sin\alpha \cdot \sin\varphi, \\ z = z_0 \cdot \cos\alpha, \end{cases} \tag{11}$$

де φ – кут напрямку вітру.

Об'єднуючи (5), (11), отримаємо:

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

$$\begin{cases} x = u + L(u,v)\sqrt{1-\left(w^*\right)^{-1}} \cdot \cos\varphi, \\ y = v + L(u,v)\sqrt{1-\left(w^*\right)^{-1}} \cdot \sin\varphi, \\ z = L(u,v) \cdot \left(w^*\right)^{-0,5}, \end{cases}$$

що після підстановки (10) дає:

$$\begin{cases} x = u + a_1 r^{0,67}(u,v)\sqrt{1-\left(w^*\right)^{-1}} \cdot \cos\varphi, \\ y = v + a_1 r^{0,67}(u,v)\sqrt{1-\left(w^*\right)^{-1}} \cdot \sin\varphi, \\ z = a_1 r^{0,67}(u,v)\left(w^*\right)^{-0,5}, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$a_1 = 17\eta^{0,67}\left(w^*\right)^{-0,21}.$$

Відзначимо, що одиничний нормальний вектор до поверхні факела у точці (x, y, z) $\in$S, де S – поверхня факела, буде мати вигляд:

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

де

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

На рис. 6 зображена поверхня факела у випадку горіння розливу нафти (кінематична в'язкість ν=40 мм^2/с; густина ρ=850 кг/м^3; питома масова швидкість вигорання η=0,034 кг/(м^2·с)) за умови відсутності вітру.

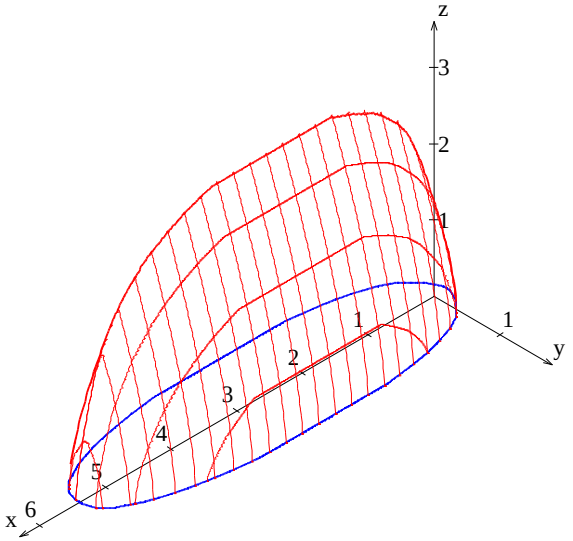


Рис. 6. Поверхня факела над розливом нафти за умови відсутності вітру

При цьому форма розливу відповідає випадку витікання з інтенсивністю 2 л/с на поверхні з кутом нахилу 3º в напрямку осі X через 100 с після початку витікання. Середню глибину нерівностей поверхні прийнято 1,7 см; гідравлічна провідність ґрунту $K=1{,}68\cdot10^{-7}$ м/с; показник капілярності h_f =0,95 м; пористість ґрунту ϕ=0,31. Площа розливу складає $S=7{,}6$ м^2 [18].

Із нерівності (9) випливає, що вітер буде відхиляти полум'я від вертикальної осі, якщо w>0,93 м/с. На рис. 7 для тих самих умов, що і на рис. 6, показано нахил факелу під впливом вітру швидкістю w=1,5 м/с та напрямом, що збігається з напрямом осі X. При цьому кут відхилення полум'я від вертикальної осі склав 38º.

На рис. 8 проілюстровано зміну кута нахилу полум'я при збільшенні площі розливу при розтіканні нафти на горизонтальній поверхні.

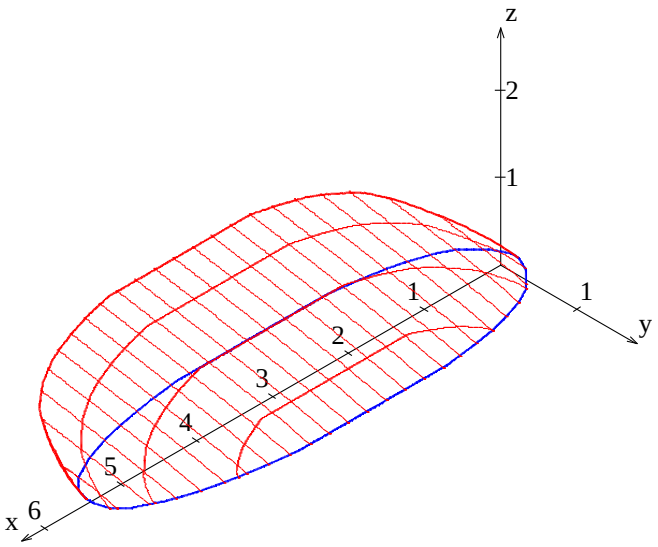


Рис. 7. Поверхня факела над розливом нафти при швидкості вітру w=1,5 м/с, направленого вздовж осі X

Із збільшенням площі розливу кут нахилу полум'я дещо зменшується: з 46,6º (рис. 8, а) до 41,1º (рис. 8, г).

6. Обговорення результатів моделювання випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини

Запропонований підхід до визначення довжини полум'я у певній точці розливу рідини, що горить, спирається на емпіричну залежність, яка притаманна широкому класу твердих і рідких речовин, і в загальному випадку описується формулою (1). Суть підходу полягає в тому, що довжина полум'я у заданій точці дорівнює довжині полум'я у точці кругового розливу, розташованій на тій самій відстані від межі розливу. Це дозволяє узагальнити (1) на випадок розливу довільної форми і отримати залежність (2). Її спрощення шляхом підстановки в нього значень для густини повітря і прискорення вільного падіння призводить до виразу (3). Із його аналізу випливає, до довжина полум'я має степеневу залежність від відстані до межі розливу і від питомої масової швидкості вигорання речовини. Зокрема, для горючих рідин показник степені для цих параметрів дорівнює 0,67 [24]. Отже, збільшення питомої масової швидкості вигорання призводить до збільшення довжини полум'я. Так, для бензину (η=0,048 кг/(м^2·с)) довжина полум'я майже в 1,7 рази перевищує довжину полум'я для нафти (η=0,022 кг/(м^2·с)) – рис. 2.

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

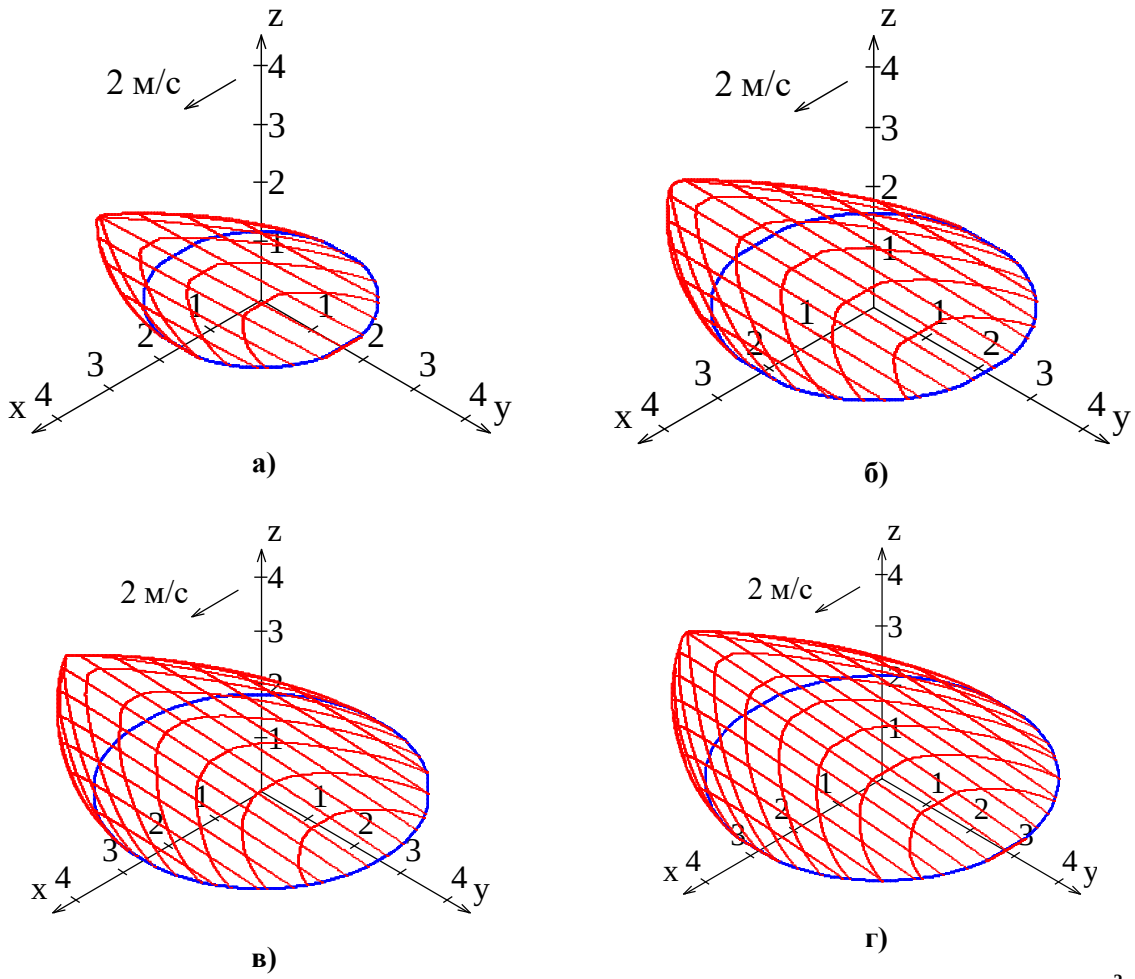


Рис. 8. Вплив вітру на форму полум'я над розливом нафти: а – t=2 хв; S=8,3 м^2; б – t=4 хв; S = 15,1 м^2; в – t=6 хв; S=20,6 м^2; г – t=8 хв; S = 25,1 м^2

Під впливом вітру полум'я відхиляється від вертикальної осі, а його довжина скорочується. Припускається, що вітер деформує полум'я таким чином, що всі точки поверхні полум'я відхиляються на однаковий кут від вертикалі. Довжина полум'я і кут його нахилу описуються формулами (4) і (5) відповідно. Їх особливістю є залежність від такого параметра як безрозмірна швидкість вітру w^* – формула (6). Це призводить до того, що існує деяке значення швидкості вітру, починаючи з якого полум'я над розливом рідини, що горить, змінює свою форму. Отже, для того, щоб вітер впливав на форму полум'я, необхідно, щоб його швидкість задовольняла умові (9). Із її аналізу випливає, що чим меншими є розміри розливу і питома масова швидкість вигорання рідини, тим сильніше вітер відхиляє полум'я від вертикальної осі. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. Наприклад, при швидкості вітру w=2 м/с він не впливає на форму полум'я над розливом бензину, діаметр якого D>22 м. Для мазуту ця нерівність має вигляд: D>30 м (рис. 4, 5).

Розтікання рідини на поверхні землі супроводжується огинанням перешкод і переважним розповсюдженням в напрямку нахилу поверхні [18]. Внаслідок цього, форма розливу відрізняється від кругової. В такому випадку пропонується для розрахунку безрозмірної швидкості вітру w^* в якості характеристики розливу використовувати його площу S замість діаметра D – формула (8). Тоді залежність

для довжини факела в певній точці розливу в умовах вітру набуває вигляду (10).

Параметричний опис поверхні полум'я над розливом рідини в умовах вітру дається формулою (11), що після підстановки в них (10) дає опис поверхні полум'я у вигляді (12). Використання опису поверхні полум'я в параметричній формі дозволяє визначити значення нормального вектору до поверхні – формули (13), (14). Це є необхідною умовою для розрахунку теплового потоку випромінюванням від пожежі.

На рис. 6, 7 проілюстровано вплив швидкості вітру на форму полум'я над одним і тим самим розливом горючої рідини. На рис. 8 показано вплив площі розливу на форму полум'я. Зокрема, кут нахилу полум'я лежить в межах від 41,1º (рис. 8, г) до 46,6º (рис. 8, а). Це відповідає результатам експериментальних досліджень, наведених в [25], де пропонується при швидкості вітру w=2 м/с приймати кут нахилу осі факела рівним 45º. При цьому відносна похибка не перевищує 9 %.

Особливістю побудованої моделі випромінюючої поверхні полум'я над розливом горючої рідини є можливість її використання для розливу довільної форми, а не лише кругової. На відміну від [25] запропонована модель враховує інтенсивність вигорання рідини, а не використовує спрощену класифікацію горюча рідини/легкозаймиста рідина.

Перевагою моделі є те, що вона спирається на низку експериментальних досліджень залежності довжини факела від розмірів осередку горіння, а також впливу вітру на кут відхилення полум'я від вертикальної осі.

До обмежень моделі слід віднести неможливість її застосування за межами експериментальних даних, що лежать від її основі.

Недоліком побудованої моделі є те, що вона виходить із сталої форми полум'я і не враховує його турбулентного характеру. Це призводить до похибки в оцінці величини теплового потоку випромінюванням від пожежі. Таким чином, перспективи подальших досліджень пов'язані із врахуванням випадкових пульсацій полум'я.

Запропонована модель може бути використана для уточнення теплового впливу пожежі на сталеві і бетонні конструкції [26]. Результати також можуть бути використані при проектуванні пожежних сповіщувачів [27].

7. Висновки

1. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела над розливом рідини довільної форми за умови відсутності вітру. Модель спирається на припущення про те, що довжина полум'я над певною точкою розливу дорівнює довжині полум'я над точкою кругового розливу, що лежить на тій самій відстані від межі розливу. Запропонований підхід дозволяє розширити існуючий клас емпіричних моделей, заснованих на експериментах з осередками горіння, що мають кругову або близьку до кругової форму, на розливи довільної форми. Довжина полум'я пропорційна питомій масовій швидкості вигорання у степені 0,67. Внаслідок цього рідини з більшим значенням цього параметра мають більшу довжину полум'я. Зокрема, довжина полум'я над розливом бензину майже в 1,7 рази перевищує довжину полум'я над таким самим розливом нафти.

2. Побудовано модель впливу вітру на форму полум'я над розливом довільної форми. Модель базується на емпіричній залежності впливу швидкості вітру на довжину полум'я і кут його відхилення від вертикальної осі. Чим меншими є розміри розливу і питома масова швидкість вигорання рідини, тим більшим є кут ві-

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

дхилення полум'я і скорочення довжини полум'я. Це пов'язано із формуванням більш потужних висхідних потоків над осередком горіння при збільшенні його розмірів і інтенсивності вигорання рідини. При цьому існує мінімальне значення швидкості вітру, при якій вітер змінює форму полум'я. Зокрема, при швидкості вітру 2 м/с він не впливає на форму полум'я над розливом бензину, діаметр якого перевищує 22 м. Для мазуту ця величина складає 30 м.

3. Побудовано модель випромінюючої поверхні факела в параметричній формі в умовах вітру. Модель спирається на емпіричні залежності довжини полум'я і кута його нахилу від характеристик осередку горіння і швидкості вітру. Отримані з моделі результати добре узгоджуються з експериментальними. Відносна похибка для кута відхилення полум'я вітром від вертикальної осі не перевищує 9 %. З практичної точки зору, це дозволяє використовувати модель для розрахунку теплового потоку випромінюванням на сусідні об'єкти.

Література

1. Huang K., Chen G., Khan F., Yang Y. Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 148. P. 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042

2. Hemmatian B., Abdolhamidzadeh B., Darbra R., Casal J. The significance of domino effect in chemical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2014. Vol. 29. P. 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003

3. Fabiano B., Caviglione C., Reverberi A. , Palazzi E. Multicomponent Hydrocarbon Pool Fire: Analytical Modelling and Field Application. Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 48. P. 187–192. doi: 10.3303/CET1648032

4. Yang R., Khan F., Neto E., 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

5. Reniers G., Cozzani V. Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Elsevier. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

6. Raja S., Tauseef S., Abbasi T. 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

7. Liu J., Li D., Wang Z., Chai X. A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

8. Zhang Zh., Zong R., Tao Ch., Ren J., Lu Sh. Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 139. P. 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019

9. He P., Wang P., Wang K., Liu X., Wang C., Tao C., Liu Y. The evolution of flame height and air flow for double rectangular pool fires. Fuel. 2019. Vol. 237. P. 486–493. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.027

10. Miao Y., Chen Y., Tang F., Zhang X., Hu L. An experimental study on flame geometry and radiation flux of line-source fire over inclined surface. Proceedings of the Combustion Institute. 2023. Vol. 39(3). P. 3795–3803. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.109

11. Chen Y., Fang J., Zhang X., Miao Y., Lin Y., Tu R., Hu L. Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. Progress in Energy and Combustion Science. 2023. Vol. 95. P. 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070

12. Guo Y., Xiao G., Wang L., Chen C., Deng H., Mi H., Tu C., Li Y. Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art. Fire Safety Journal. 2023. Vol. 136. P. 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755

13. Yao Y., Li Y. Z., Ingason H., Cheng X. Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind // Fire Safety Journal. 2019. Vol. 105. P. 41–50. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.004

14. Yao Y., Li Y. Z., Ingason H., Cheng X., Zhang H. Theoretical and numerical study on influence of wind on mass loss rates of heptane pool fires at different scales. Fire Safety Journal. 2021. Vol. 120. P. 103048. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103048

15. Ditch B. D., Ris J. L., Blanchat T. K., Chaos M., Bill R. G., Dorofeev S. B. Pool fires – An empirical correlation. Combustion and Flame. 2013. Vol. 160(12). P. 2964–2974. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.020

16. Drysdale D. An Introduction to Fire Dynamics. 3nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York. 2011. doi: 10.1002/9781119975465

17. Abramov Y., Basmanov O., Krivtsova V., Salamov J. Modeling of spilling and extinguishing of burning fuel on horizontal surface. Naukovyi Visnyk NHU. 2019. Vol. 4. P. 86–90. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/16

18. Олійник В. В., Басманов О. Є. Модель розтікання і горіння рідини на ґрунті. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. Вип. 1(37). С. 18–30. doi: 10.52363/
2524-0226-2023-37-2

19. Abramov Y., Basmanov O., Khmyrov I., Oliinik V. Justifying the experimental method for determining the parameters of liquid infiltration in bulk material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 4/10(118). P. 24–29. doi: 10.15587/1729-4061.2022.262249

20. Abramov Y., Basmanov O., Oliinik V., Khmyrov I., Khmyrova A. Modeling the convective component of the heat flow from a spill fire at railway accidence. EUREKA: Physics and Engineering. 2022. Vol. 6. P. 128–138. doi: 10.21303/2461-4262.2022.002702

21. Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.179

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

23. Abramov Y., Basmanov O., Salamov J., Mikhayluk A., Yashchenko O. Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1/10(97). P. 14–20. doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

24. Lees F. P. Loss prevention in the process industries. 4th Edition. 2012. Vol. 2. doi: 10.1016/C2009-0-24104-3

25. Інструкція щодо гасіння пожеж у резервуарах із нафтою і нафтопродуктами. НАПБ 05.035–2004: Офіц. вид. – К.: М-во з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, 2004. 79 с. (нормативний документ МНС України. Інструкція). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnya_pozhezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf

© В. В. Олійник, О. Є. Басманов

26. 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, 012065. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

27. Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Skliarov S. Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 4(9). P. 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

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

DEVELOPING A MODEL OF THE RADIATING SURFACE OF A FLAME OVER A FLAMMABLE LIQUID SPILL IN THE PRESENCE OF WIND

The object of the study is a spill fire. The subject of the study is the geometric characteristics of the flame, in particular, the length and angle of inclination. The model of the radiating surface of a flame over a burning liquid spill of an arbitrary shape is constructed. The essence of the approach is that the length of the flame at a given point is equal to the length of the flame at the point of the circular spill located at the same distance from the boundary of the spill. It allows generalizing the known empirical dependences for the case of spills of arbitrary shape. The flame length is a power-law function of the distance to the spill boundary and the mass loss rate per unit area. To take into account the effect of wind on the shape of the flame, the empirical dependence of the length and angle of inclination of the flame on the wind speed is used. It is assumed that the wind deforms the flame in such a way that all points of the flame surface deviate by the same angle from the vertical. Wind inclines the flame from the vertical axis more significantly for the smaller size of the spill and smaller mass loss rate per unit area. This is due to the formation of more powerful upward currents over the combustion center when its size and intensity of liquid combustion increase. A model of the radiating surface of the flame was constructed in a parametric form. The results obtained from the model are in good agreement with the experimental ones. The relative error for the angle of deviation of the flame by the wind from the vertical axis does not exceed 9%. In practice, this opens up opportunities for calculating the thermal impact on nearby technological objects, as well as determining safe zones for the location of personnel and equipment involved in fire suppression. The model can be used to specify the thermal effect of fire on steel and concrete structures.

Keywords: flammable liquid spill, spill fire, radiating flame surface, heat flow

References

1. Huang, K., Chen, G., Khan, F., Yang, Y. (2021). Dynamic analysis for fire-induced domino effects in chemical process industries. Process Safety and Environmental Protection, 148, 686–697. doi: 10.1016/j.psep.2021.01.042

2. Hemmatian, B., Abdolhamidzadeh, B., Darbra, R., Casal, J. (2014). The significance of domino effect in chemical accidents. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 29, 30–38. doi: 10.1016/j.jlp.2014.01.003

3. 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

4. Yang, R., Khan, F., Neto, E., 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

5. Reniers G., Cozzani V. (2013). Features of Escalation Scenarios. Domino Effects in the Process Industries. Elsevier. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

6. 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

7. Liu, J., Li, D., Wang, Z., Chai, X. (2021). A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

8. Zhang, Zh., Zong, R., Tao, Ch., Ren, J., Lu, Sh. (2020). Experimental study on flame height of two oil tank fires under different lip heights and distances. Process Safety and Environmental Protection, 139, 182–190. doi: 10.1016/j.psep.2020.04.019

9. He, P., Wang, P., Wang, K., Liu, X., Wang, C., Tao, C., Liu, Y. (2019). The evolution of flame height and air flow for double rectangular pool fires, Fuel, 237, 486–493. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.027

10. Miao, Y., Chen, Y., Tang, F., Zhang, X., Hu, L. (2023). An experimental study on flame geometry and radiation flux of line-source fire over inclined surface. Proceedings of the Combustion Institute, 39(3), 3795–3803. doi: 10.1016/j.proci.2022.07.109

11. Chen, Y., Fang, J., Zhang, X., Miao, Y., Lin, Y., Tu, R., Hu, L. (2023). Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances, Progress in Energy and Combustion Science, 95, 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070

12. Guo, Y., Xiao, G., Wang, L., Chen, C., Deng, H., Mi, H., Tu, C., Li, Y. (2023). Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art, Fire Safety Journal, 136, 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755

13. Yao, Y., Li, Y., Ingason, H., Cheng, X. (2019). Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind, Fire Safety Journal, 105, 41–50. doi: 10.1016/j.firesaf.2019.02.004

14. Yao, Y., Li, Y., Ingason, H., Cheng, X., Zhang, H. (2021). Theoretical and numerical study on influence of wind on mass loss rates of heptane pool fires at different scales, Fire Safety Journal, 120, 103048. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103048

15. Ditch, B. D., Ris, J. L., Blanchat, T. K., Chaos, M., Bill, R. G., Dorofeev, S. B. (2013). Pool fires – An empirical correlation, Combustion and Flame, 160 (12), 2964–2974. doi: 10.1016/j.combustflame.2013.06.020

16. Drysdale, D. An Introduction to Fire Dynamics. (2011). 3nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., New York. doi: 10.1002/9781119975465

17. 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

18. 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

19. 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

20. 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

21. 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. In Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 1006, 179–184. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.179

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

23. Abramov, Y., Basmanov, O., Salamov, J., Mikhayluk, A., Yashchenko, O. (2019). Developing a model of tank cooling by water jets from hydraulic monitors under conditions of fire, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/10(97), 14–20 doi: 10.15587/1729-4061.2019.154669

24. Lees, F. P. (2012). Loss prevention in the process industries, 4th Edition. doi: 10.1016/C2009-0-24104-3

25. Instructions for extinguishing fires in tanks with oil and oil products. Normative act on fire safety 05.035–2004, 79. Available at: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/instrukciya_schodo_gasinnya_pozhezh_u_rezervuarakh_iz_naftoyu.pdf

26. 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, 012065. doi: 10.1088/1757-899X/708/1/012065

27. Pospelov, B., Andronov, V., Rybka, E., Skliarov. S. (2017). Design of fire detectors capable of self-adjusting by ignition. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(9), 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.108448

Надійшла до редколегії: 19.09.2023
Прийнята до друку: 10.11.2023

УДК 514.18

А. Я. Калиновський, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-1021-5799)*
Л. М. Куценко, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1554-8848)*
О. Г. Поліванов, *викл. каф. (ORCID 0000-0002-6396-1680)*
Б. І. Кривошей, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-2561-5568)*
О. В. Савченко, *к.т.н., с.н.с., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-1305-7415)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ДОСТАВКИ ВОГНЕГАСНОГО КОНТЕЙНЕРА ДО ВЕРХНІХ ПОВЕРХІВ БУДІВЕЛЬ

Розроблено спосіб моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будівель, де виникла пожежа. У якості стартового засобу застосовується імпульсний вогнегасник Тайфун-10, який використовується як пневматична гармата. Це дозволяє доставляти до осередку пожежі вогнегасні речовини дискретно, поміщені у спеціальний контейнер. Для визначення раціональної траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі було залучено відомі з механіки диференціальні рівняння та їх розв'язки. Ці співвідношення пов'язують між собою параметри, характерні для точок шуканої траєкторії. Доповненням до цих результатів стануть знайдені в роботі залежності для опису навісної та настільної траєкторій, що перетинаються в точці палаючого вікна будівлі. А також визначені значення мінімальної стартової швидкості для доставки контейнера в заздалегідь задане вікно будівлі необхідного поверху. При цьому вважається, що для розрахунків відома висота розташування палаючого вікна (від фундаменту будівлі), а також відома відстань від імпульсного вогнегасника до стіни будівлі. Складено maple-програму для перевірки одержаних залежностей шляхом побудови траєкторій доставки засобами комп'ютерної графіки. Результати представлені у вигляді таблиці, де початкові швидкості та кути вильоту контейнера поставлені у залежність від номеру поверху будівлі. Проведені дослідження спрямовані на розвиток тактики гасіння пожеж у багатоповерхових будинках способом метання (або закидання, using Fire extinguisher Ball). Цій технології притаманна оперативність ліквідації пожежі пожежно-рятувальними підрозділами, незалежно від стану під'їзних шляхів до будівлі, а також від існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком. Все це дозволить запобігти поширенню пожежі завдяки її оперативній локалізації та ліквідації.

Ключові слова: контейнер, вогнегасна речовина, імпульсний вогнегасник, точка перетину траєкторій, мінімальна стартова швидкість

1. Вступ

Ефективність гасіння пожежі залежить від швидкості прибуття на місце пожежно-рятувальних підрозділів. Це дає шанс її ліквідувати на етапі початкової фази горіння. На оперативність прибуття пожежних суттєво впливають стан під'їзних шляхів до будівлі, а також існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком, що заважає швидкій доставці вогнегасних речовин до осередку пожежі. Особливо це стосується пожеж, які виникають на верхніх поверхах багатоповерхових будинків. В цьому випадку вогнегасну речовину для оперативності доцільно доставляти дистанційно, наприклад, метанням або закидуванням (у літературі застосовується термін Fire extinguisher Ball [1]).

Необхідність проводити наукові дослідження стосовно дистанційної доставки контейнерів з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа, пояснюється необхідністю розробки сучасних способів протипожежного захисту цього класу будівель. Відомі варіанти застосування «пожежних» дронів, але стикаються з необхідністю їх постійної «дозаправки» новим контейнером після кожної доставки. Це суттєво уповільнює інтенсивність гасіння пожежі. Однак, коли у якості засобу доставки використовується імпульсний вог-

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

негасник типу пневматичної гармати, то доставку контейнерів можливо здійснювати серіями безперервних контейнерних «черг», що дозволить швидко локалізувати пожежу. Тематика дистанційної доставки контейнерів до вікон верхніх поверхів будинків пов'язана з використанням сучасних математичних способів балістичного наведення контейнерів до цілі, які можуть використовуватись і для інших аварійно-рятувальних робіт. Наприклад, встановлення якірних тросів для евакуації людей. При цьому комп'ютерне моделювання траєкторій переміщень контейнерів займатиме ключове місце. Зазначений підхід до розрахунку траєкторій переміщень контейнерів можна також покласти в основу забезпечення сучасних планшетів відповідними програмними продуктами.

Проведені дослідження дозволять започаткувати нову технологію гасіння пожеж у багатоповерхових будинках способом «гарматного» метання. Цій технології притаманна оперативність ліквідації пожежі незалежно від стану під'їзних шляхів до будівлі, а також від існування різноманітних перепон безпосередньо на подвір'ї перед будинком. Проведені дослідження можуть дати практиці такі результати. Розробити технологічні таблиці значень кутів вильоту контейнера залежно від відстані гармати до будівлі і висоти вікна від фундаменту. (В подальшому це буде реалізовано за допомогою планшетів). Розрахувати вплив вітру на зміну «штильової» траєкторії контейнера. Крім того, одержані результати в подальшому доцільно покласти в основу створення комп'ютерних симуляторів для проведення тренувань особового складу в режимі «штабних ігор».

Зазначене вказує на актуальність дослідження проблеми дистанційної доставки контейнерів з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сучасна тенденція захисту від пожеж квартир та офісів спрямована на використання вогнегасників, які мають вигляд кулі, наповненої вогнегасною речовиною [1]. Такі вогнегасні засоби прийнято називати «вогнегасними кулями» (fire extinguisher ball). Корпус кулі виготовлено з пінопластика, обгорненого плівкою з полівінілхлориду. Коли така куля, кинута у вогонь, зіштовхується з полум'ям пожежі, вона самознищується й вивільняє уміст, який являє собою суміш моноаммонійфосфата й сульфату амонію. Уміст нетоксичний і безпечний, тому не впливає на людей. Найкраще підходить для пожеж побутових, пов'язаних з електрикою та кухонними газовими плитами. Цікаво, що після закінчення строку придатності вогнегасну речовину (монофосфат амонію, змішаний з водою) можна використовувати як садове добриво.

Безпечність і ефективність «вогненних куль» сприяла виникненню ідеї дистанційного гасіння пожеж. Особливо, якщо це стосується пожеж на верхніх поверхах висотних будівель. Навіть, своєчасне прибуття пожежних-рятувальників до будівлі не дозволить відразу приступити до гасіння «висотної» пожежі. Тому доцільною буде розробка технології гасіння пожеж на верхніх поверхах будівлі шляхом дистанційної доставки аналогічних «вогнегасних куль» до палаючого вікна. Для реалізації такої технології необхідно наладити виготовлення спеціальних контейнерів з вогнегасним речовинами. А також розробити засоби їх доставки способом метання до вікон висотки. В даній роботі у якості засобу доставки пропонується використати пневматичну гармату. З контейнером сферичної форми це буде, мабуть, найнадійніший спосіб доставки (маючи на увазі інші механічні ка-

тапульти). Враховуючи, що зазначена доставка здійснюється до сукупності скляних вікон, то помилки в розрахунках можуть спричинити їх пошкодження, що додасть проблем при ліквідації пожежі.

Задача доставки контейнера з вогнегасною речовиною до верхніх поверхів будівель є спорідненою для таких задач як виконання прицільних стрільб в артилерії, а також здійснення результативних дій в ігрових видах спорту (баскетбол, бейсбол, волейбол тощо). Інтернет наповнений науковими роботами стосовно застосування другого закону Ньютона до параболічного руху об'єкта в повітряному середовищі. При цьому фахівці-артилеристи досліджують балістичні переміщення снарядів, а фахівці-біомеханіки вивчають впливи зусиль спортсмена на траєкторію м'яча.

В роботі [2] розглядається задача перельоту снаряда через паркан певної висоти, розташованого на відомій відстані від місця пострілу. Визначені умови вибору швидкості і кута вильоту для того, щоб снаряд приземлився по іншу сторону забору. Але в статті відсутня інформація про можливості графічного унаочнення результатів руху у вертикальній площині, що суттєво скорочує можливості використання формул. В роботі [3] наведено розрахунок критичного кута пострілу снаряда з відомою початковою швидкістю, який приводить до максимальної горизонтальної відстані вильоту. При цьому місце пострілу розташоване на вищому місці відносно заданої висоти приземлення. Але для програмної реалізації такого підходу недостає аналізу параметрів, коли розв'язки можуть бути відсутніми. Такі умови можуть привести до неадекватності одержаного рішення. В роботі [4] розрахунок полягає в обчисленні критичного кута пострілу з поверхні землі убік місця більшої висоти, розташованої на заданій відстані перед місцем пострілу. Задача полягає у визначенні умов для досягнення максимальної горизонтальної відстані на більш високому місці. Але для складання програми унаочнення графічної моделі необхідні дані про варіанти взаємних співвідношень параметрів, які в роботі відсутні. Це може привести до некоректності одержаного розв'язку. В роботі [5] аналітично досліджено рух снаряда з заданою початковою швидкістю, який рухається під дією гравітаційного поля тяжіння й на який впливає сила опору повітря. В роботі [6] наведено формули для обчислення початкової швидкості і кута вильоту за умови, що тіло рухається по параболічній траєкторії. Але в зазначених роботах відсутня інформація про особливості створення комп'ютерних програм графічного унаочнення одержаних результатів. Особливо це стосується програм, створених в середовищі математичного пакету maple. В роботі [7] наведено спосіб обчислення мінімальної швидкості снаряда, яка необхідна для враження цілі з заданими координатами (снаряд рухається по параболічній траєкторії). При цьому в роботі відсутня інформація про тестові параметри, з якими доцільно налагоджувати створену комп'ютерну програму. А в роботі [8] досліджено у якій точці траєкторії снаряд має мінімальну швидкість. Але в цих роботах не наведено інформацію про можливості графічних побудов, які допомогли б шляхом унаочнення траєкторій руху снаряда одержати розв'язок. В роботі [9] систематизовано формули опису траєкторії руху снаряда. В роботі [10] наведено приклад maple-програми моделювання параболічної траєкторії руху снаряда. Але в жодній статті не наведено дані про діапазони зміни параметрів для забезпечення стабільного графічного розв'язку.

Проведений мета-аналіз вказує на відсутність стратегії створення комп'ютерних програм, які базуються на графічній інтерпретації одержаних розв'язків. Наприклад, графічна інтерпретація буде доцільною для опису кутів

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі. Крім того, у відомих роботах у явному вигляді відсутні розрахунки мінімальної початкової швидкості, здатної забезпечити досягнення палаючого вікні будівлі. Це затрудняє створення програмного забезпечення для реалізації на практиці ідеї доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будівель. В роботах також відсутні результати стосовно розробки програмного забезпечення планшетів для моделювання ситуацій, які виникають в процесі доставки контейнерів до верхніх поверхів будівель.

Наведене вказує на необхідність вирішення проблеми, що пов'язана з новою технологією гасіння пожеж у будівлях підвищеної поверховості. При цьому необхідно використовувати (модернізовані) пневматичні гармати, здатні доставляти до вікна приміщення, де відбулася пожежа, контейнери з вогнегасною речовиною. В даній роботі передбачається вирішення лише частини зазначеної проблеми – розрахунок раціональних траєкторій руху контейнера з вогнегасною речовиною за умови, що стартовим пристроєм доставки обрано пневматичну гармату.

3. Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є розробка способу моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа. За умови, що у якості засобу доставки використовується імпульсний вогнегасник типу пневматичної гармати.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– описати кути вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі);

– розрахувати мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі;

– описати траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над фундаментом за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом проведених досліджень є розвиток метода гасіння пожеж у будівлях підвищеної поверховості з використанням пневматичної гармати, яка дозволяє дистанційно доставляти до палаючого вікна контейнер з вогнегасною речовиною. Контейнер повинен досягти цілі і самознищенням вивільнити речовину, чим сприяти локалізації та ліквідації пожежі.

Предметом досліджень є розробка способу геометричного моделювання траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікна пожежі на верхніх поверхах будинків, коли у якості засобу доставки використовується імпульсний вогнегасник виду пневматичної гармати.

Гіпотеза досліджень полягає у можливості враховувати основні сили, що діють на контейнер у фазі його польоту. А саме, гравітація надає контейнеру прискорення вниз, змушуючи його відхилятися від прямолінійного польоту, опір (протидія) повітря, сповільнює контейнер із силою пропорційно швидкості (лінійно або квадратично). Вітер змушує контейнер відхилятися від своєї траєкторії. Під час польоту, гравітація, опір і вітер надають найбільший вклад у зміну траєкторії польоту контейнера. Це слід враховувати при прогнозування польоту контейнера. При подальших дослідженнях можливо врахувати ряд інших ефектів, таких як

вертикальні кути, температура і щільність повітря, гіроскопічний дрейф та інше.

При цьому вважається, що форма траєкторії залежить від основних геометричних та фізичних параметрів: маси контейнера, початкової швидкості та кута його вильоту (відносно рівня горизонту), радіуса сферичного контейнера, коефіцієнта опору форми контейнера (яку часто називають парусністю), значення цільності повітря, а також характерної площі опору руху контейнера. Проблема полягає у виборі таких значень кута вильоту та початкової швидкості вильоту, щоб контейнер з вогнегасною речовиною влучив у вікно, за яким палає пожежа.

Допущення досліджень пов'язано з ідеалізацією поняття траєкторії доставки контейнера на верхні поверхи будівлі. Вважається, що рух контейнера відбувається у вертикальній площині, і що центр мас контейнера рухатиметься по параболічний траєкторії. Саме цей факт є суттєвим в роботі при одержанні аналітичних залежностей. Під поняттям «доставки контейнера до палаючого вікна» будемо розуміти доставку центра маси контейнера до центральної точки вікна з пожежею.

Для реалізації на практиці розглянутої ідеї розрахунку траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі необхідно мати спосіб розв'язання диференціальних рівнянь, які описують процес переміщення контейнера по параболічній траєкторії. Бажано б одержати такі розв'язки з використанням аналітичних співвідношень. В даній роботі для цього обрано математичний процесор maple, за допомогою якого вдалося одержати і спростити аналітичні вирази, а також скласти програми опису і унаочнення необхідних траєкторій з метою контролю одержаних формул.

5. Побудова настільної і навісної траєкторій, які перетинаються в заданій точці вікна

Перший етап обраного логічного ланцюжка розрахунку траєкторій виявляється у визначенні пари кутів вильоту контейнера, які забезпечують існування настільної і навісної траєкторій. При цьому зазначені траєкторії мають перетинатися в заданій точці палаючого вікна будівлі [11].

Нехай в декартовій системі координат Oxyz у вертикальній площині задано точку з координатами M(x,z). З початку координат вилітає фізичне тіло (наприклад, контейнер у формі кулі) за умови, що на нього діє поле земного тяжіння. Необхідно визначити формулу для опису кута вильоту контейнера, здатного влучити в точку M(x,z). Вважатимемо, що тіло має постійну швидкість v, а гравітація визначається прискоренням земного тяжіння g=9,81. Задача формулюється так: під яким кутом до горизонту необхідно направити контейнер, щоб він потрапив у точку M?

Для виводу формули розглянемо відомі з механіки рівняння руху точки:

$$x = vt\cos\alpha, \tag{1}$$

$$z = vt\sin\alpha - \frac{gt^2}{2}, \tag{2}$$

де t – час, v – швидкість.

Рівняння (1) описує горизонтальні координати переміщення точки, а рівняння (8) – її вертикальні координати. З рівняння (1) визначимо час t:

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

$$t = \frac{x}{v\cos\alpha}. \tag{3}$$

Далі, підставивши вираз (3) в формулу (2), одержимо:

$$z = \frac{vx\sin\alpha}{v\cos\alpha} - \frac{gx^2}{v^2\cos^2\alpha}. \tag{4}$$

Виконаємо тригонометричну підстановку $\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = tg\alpha$:

$$z = xtg\alpha - \frac{gx^2}{2v^2\cos^2\alpha}. \tag{5}$$

Далі, аналогічно, виконаємо підстановку $\frac{1}{\cos^2\alpha} = 1 + tg^2\alpha$

$$z = xtg\alpha - \frac{gx^2}{2v^2}(1 + tg^2\alpha). \tag{6}$$

У формулі (6) розкриємо дужки і здійснимо її спрощення:

$$0 = -\frac{gx^2}{2v^2}tg^2\alpha + xtg\alpha - \frac{gx^2}{2v^2} - z. \tag{7}$$

Розглядаючи вираз (7) як квадратне рівняння відносно $tg\alpha$, застосуємо формулу визначення коренів цього рівняння:

$$tg\alpha = \frac{-x \pm \sqrt{x^2 - \frac{-gx^2}{2v^2}\left(\frac{-gx^2}{2v^2} - z\right)}}{2\frac{-gx^2}{2v^2}}. \tag{8}$$

Помножимо чисельник і знаменних на вираз $-\frac{v^2}{x}$. Потім перенесемо вираз $\frac{v^4}{x^2}$ під знак кореня і одержимо:

$$tg\alpha = \frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2z)}}{gx}. \tag{9}$$

На завершення застосуємо до кожної частини арктангенс:

$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{v^2 \pm \sqrt{v^4 - g(gx^2 + 2v^2 z)}}{gx}. \qquad (10)$$

В результаті одержано два корені рівняння, які визначають описи двох кутів. А саме кутів вильоту тіла, які забезпечують існування настільної і навісної траєкторії його руху. Тобто два корені рівняння відповідатимуть двом можливим кутам запуску за умови, що вони не уявні. В противному випадку можна стверджувати, що початкова швидкість фізичного тіла недостатньо велика для досягнення ним вибраної точки (x, y). Отже, формула (10) дозволяє знайти необхідний кут запуску без якихось обмежень.

При моделюванні геометричної форми траєкторії переміщення контейнера з вогнегасною речовиною приділимо увагу її адекватності. Для цього в диференціальні рівняння введено певну кількість параметрів. На даному етапі досліджень будуть враховані основні фізичні величини, які суттєво впливатимуть на форму траєкторії.

За основу розрахунків оберемо диференціальні рівняння [12, 13]:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \cos\alpha}{2m};$$
$$\frac{d^2z}{dt^2} = -g - \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 C_f \frac{\rho S \sin\alpha}{2m}; \qquad (11)$$

де m – маса контейнера; α – кут вильоту контейнера; C_f – безрозмірний коефіцієнт опору форми контейнера; ρ – щільність середовища (повітря), (кг/м^3); v – швидкість вітру (або тіла в потоці), (м/с); S – характерна площа перпендикулярно потоку вітру, (м^2); для сферичних тіл S є функцією від об'єму: $S = \pi R^2$.

Було складено maple-програму побудови зазначених траєкторій (10), які досягають заданої точки на будівлі. Фрагмент програми наведено на рис. 1.

```
      alpha1:=
 arctan((v0^2 – sqrt(v0^4-g*(g*L^2 + 2*H*v0^2)))/(g*L));
       strim1:= plot([x(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S),
            y(t,v0,alpha1,m,Cf,rho,S), t=0..2.3], scaling=CONSTRAINED,
color=blue,thickness=3,linestyle=4):
      alpha2:=
arctan((v0^2 + sqrt(v0^4-g*(g*L^2 + 2*H*v0^2)))/(g*L));
      strim2:= plot([x(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S),
            y(t,v0,alpha2,m,Cf,rho,S), t=0..3.5], scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4):
```

Рис. 1. Фрагмент maple- програми побудови траєкторій руху контейнера

Вирази для функцій x(t) і y(t) одержуються в результаті розв'язання диференціальних рівнянь руху контейнера (1) при таких початкових умовах:

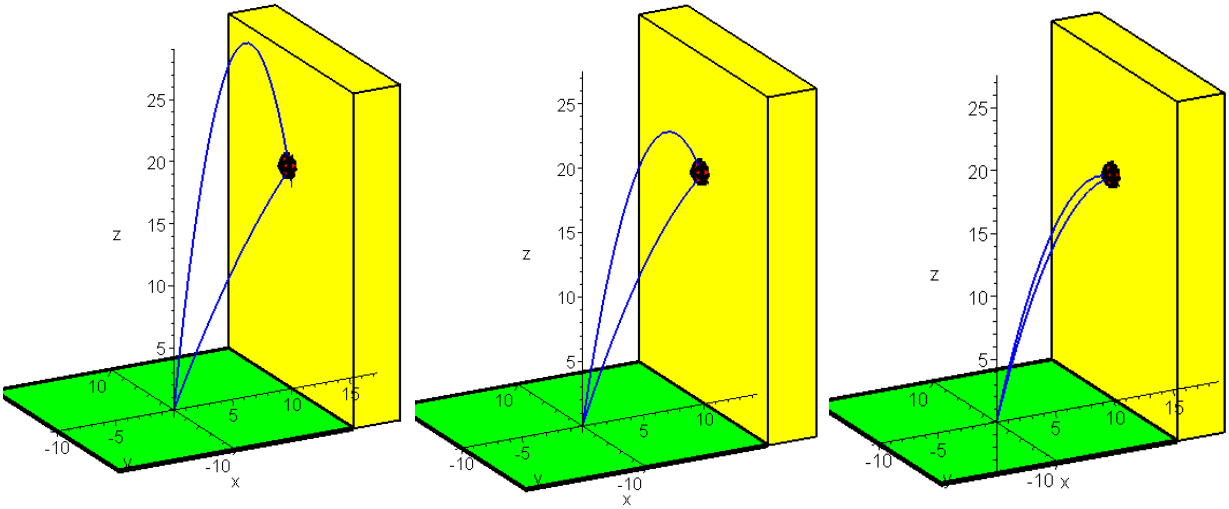
x0:=0: y0:=0: v0_x:=v0*cos(alpha): v0_y:=v0*sin(alpha):

де **v0** – початкова швидкість вильоту контейнера. В результаті отримали аналітичні

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

вирази для функцій x(t) та y(t), що визначають координати траєкторії руху контейнера. Аналітичні вирази мають громіздкий вигляд і тут не наводяться. Переконатися у їх достовірності зможемо за допомогою тестових розрахунків. В програмі на рис. 1 α1 і α2 – кути (у радіанах) до горизонту, під якими необхідно запустити контейнер, щоб траєкторії перетнулись у необхідній точці вікна будівлі.

На рис. 2 зображено результат виконання складеної maple- програми. При цьому значення параметрів обрано такі: **m=0,145; r=0,069; Cf=0,01; rho=1,2; S=π*r^2; g=9,81**. Значення кутів вильоту та початкові швидкості вильоту вказані на рис. 2.



$a1 = 1.169860957$ $a1 = 1.222734960$ $a1 = 1.300624112$

$a2 = 1.464633192$ $a2 = 1.411759189$ $a2 = 1.333870037$

v0:=24 **v0:=21** **v0:=19.5:**

Рис. 2. Ілюстрація залежності кутів вильоту від початкової швидкості вильоту

Побудовані зображення переконують у існуванні деякої мінімальної швидкості вильоту, яка дозволяє поєднуватись (зливатися) навісній та настільній траєкторіям, а також забезпечує потрапляння контейнера у задану точку будівлі.

6. Розрахунок доставки контейнера з мінімальною початковою швидкістю до вікна з пожежею

Другий етап логічного ланцюжка розрахунку траєкторій полягає у обчисленні мінімальної швидкості вильоту, яка проявляється у вигляді умови поєднання (злиття) навісної та настільної траєкторій [12].

Вважатимемо, що контейнер з вогнегасною речовиною випущений з початку координат системи Oxz під кутом α до горизонту. Рівняння руху по параболічній траєкторії має вигляд:

$$z = x\operatorname{tg}\alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2\cos^2\alpha}. \qquad (12)$$

Необхідно визначити мінімальну початкову швидкість вильоту, здатну доставити тіло з точки початку координат до наперед заданої точки з координатами M (L, H). Підставимо координати точки M (L, H) в рівняння траєкторії руху тіла. В результаті одержимо:

$$H = Ltg\alpha - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}. \quad (13)$$

Це еквівалентно умовам поставленої задачі.

Рівняння (13) встановлює зв'язок між кутом вильоту α та мінімальною початковою швидкістю v0, необхідної для того, щоб тіло досягло заданої точки. Для одержання прийнятного для практики розв'язку необхідно обчислити похідну функції (13) по α, щоб знайти критичне значення α_K кута α, при якому початкова швидкість буде мінімальна:

$$0 = \frac{L}{\cos^2 \alpha} + \frac{gL^2}{v_0^3 \cos^2 \alpha} \frac{dv_0}{d\alpha} - \frac{gL^2 \sin \alpha}{2v_0^2 \cos^3 \alpha}. \quad (14)$$

При критичному куті α_K матимемо $dv_0 / d\alpha = 0$ Із рівняння (14) слідує співвідношення:

$$tg\alpha_K = \frac{v_0^2}{gL}. \quad (15)$$

З врахуванням рівняння (15) і тотожності $1 + tg^2\alpha = \frac{1}{\cos^2 \alpha}$, з рівняння (12) отримаємо:

$$H = \frac{v_0^2}{g} - \frac{gL^2}{2v_0^2}\left(1 + \frac{v_0^4}{g^2 L^2}\right), \quad (16)$$

що еквівалентно виразу:

$$H = \frac{v_0^2}{2g} - \frac{gL^2}{2v_0^2}. \quad (17)$$

Вираз (17) можна переписати [1–3] у вигляді біквадратного рівняння відносно v_0:

$$v_0^4 - 2gHv_0^2 - g^2L^2 = 0. \quad (18)$$

Розв'язок рівняння (18) має вигляд:

$$v_0 = \sqrt{gH}\sqrt{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{H}\right)^2}}. \quad (19)$$

Критичне значення кута α_K для досягнення мінімальної швидкості вильоту визначається шляхом підключення рівняння (19) до рівняння (15):

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

$$\mathrm{tg}\alpha_K = \frac{H}{L}\left(1+\sqrt{1+\left(\frac{L}{H}\right)^2}\right). \qquad (20)$$

Покажемо, що траєкторія з мінімальною початковою швидкістю не досягає екстремуму у положенні точки цілі. Використовуючи рівняння (14) розрахуємо горизонтальне положення максимальної висоти траєкторії. Для цього скористаємося рівнянням dz/dx=0. Отже, положення максимальної висоти (екстремуму функції з (14)) знаходиться на відстані:

$$x = \frac{v_0^2}{g}\frac{\mathrm{tg}\alpha_K}{1+\mathrm{tg}^2\alpha_K}. \qquad (21)$$

А з врахуванням формули (15) одержимо іншу (реальну) відстань:

$$x = \frac{L}{1+\left(gL/v_0^2\right)^2}. \qquad (22)$$

Вираз (22) визначає місце максимальної висоти переміщення тіла. Максимум досягається перед точкою цілі. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Ця властивість траєкторії з мінімальною початковою швидкістю руху виявилась корисною для практики застосування пневматичної гармати.

Перевіримо цей результат «на цифрах». Для цього використаємо елементи maple-програми.

А) теоретично знайдене значення мінімальної швидкості (19)

```
v0min:=sqrt(g*H)*sqrt(1+sqrt(1+(L/H)^2)^2);
```

Б) знайдене значення тангенса критичного кута вильоту (20)

```
tgk:=H*(1+sqrt(1+(L/H)^2))/L;
```

В) відстань до положення найвищої точки траєкторії (21)

```
x1:=v0min^2*tgk/(g*(1+tgk^2));
```

Г) відстань до положення знайденого екстремуму (22)

```
x2:=L/(1+(g*L/v0min^2)^2);
```

Проілюструємо одержані результати з використанням цифр. Для цього, як приклад, оберемо відстань до стіни L=10 і три варіанти висот вікон h=9, h=18 і h=27. В результаті обчислень за наведеними формулами (19–22) отримуємо:

v0=16,89911241; tgk=2,245362405; x1=10,81905925; x2=8,944542900;
v0=20,19059187; tgk=3,859126028; x1=10,09058091; x2=9,452613939;
v0=23,79229567; tgk=5,579236010; x1=10,02066233; x2=9,708430785.

Отже, розрахунки вказують на те, що максимум функція (22) досягатиме на відстані меншою, ніж відстань до стіни. А це вказує на те, що траєкторія на прикінцевій фазі буде настільною. Тобто, контейнер прибуде до вікна з мінімальною кінетичною енергією, що мінімізує ймовірність пошкоджень сусідніх вікон у разі помилок у розрахунках траєкторії руху.

На завершення додамо, що дослідження стосовно мінімальної стартової швидкості спрямовані на економне використання стисненого повітря в процесі оперативного застосування пневматичної гармати. Для економії цього ресурсу доцільно здійснювати результативні «постріли» з мінімальним тиском для забезпечення необхідної мінімальної швидкості вильоту контейнера.

7. Розрахунок траєкторії доставки контейнера до вікна за двома відомими відстанями

Третій етап логічного ланцюжка розрахунку траєкторій доставки контейнера до палаючого вікна полягає у одержанні виразів для обчислення значень початкової швидкості вильоту і кута вильоту. Особливість результату у тому, що для опису використовуються лише два вхідні параметри – задана висота (центральної точки) вікна до фундаменту будівлі, а також задана відстань від імпульсного вогнегасника до стіни [13]. Ці відстані вимірюються лазерним далекоміром, який використовується у будівництві.

Апріорі вважається, що центр мас контейнера рухатиметься по параболічний траєкторії. Саме цей факт суттєвий при одержанні залежностей. Суттєвим буде і умовне поняття координат палаючого вікна, яке вимірюється такими відстанями: L – від пневматичної гармати до стіни, а також H – висотою положення вікна від фундаменту.

Для реалізації розглянутого способу необхідні лише значення відстаней L і H, виміряних за допомогою, наприклад, лазерного далекоміра Flus «FL-60», який використовується у будівництві. А також необхідні формули для обчислення миттєвої швидкості v_0 вильоту контейнера, і значення кута вильоту α відносно рівня горизонту. Ці параметри можна вирахувати також через зазначені координати L і H, які слід сприймати як початкові дані розв'язання задачі параболічного руху контейнера.

Для опису траєкторії доставки контейнера до верхніх поверхів будівлі залучимо відомі з фізики рівняння [1], які пов'язують між собою фізичні та геометричні параметри, що дозволяють визначити точки траєкторії руху.

Нехай в декартовій системі координат Oxyz задано точку M (L, H), розташовану у вертикальній площині. З початку координат цієї площини за допомогою пневматичної гармати вилітає контейнер з вогнегасною речовиною, наприклад, у формі кулі. Користуючись лише координатами L і H точки цілі M (L, H), визначимо значення кута α вильоту контейнера, а також значення мінімальної швидкості v_0 для досягнення точки цілі M [2, 3].

Рівняння руху контейнера задамо у параметричній формі:

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

$$x = v_0 \cos\alpha\, t;\ z = v_0 \sin\alpha\, t - \frac{gt^2}{2}. \quad (23)$$

Виключимо з першої формули (23) час t і підставимо його в друге рівняння. В результаті одержимо рівняння руху контейнера в координатній формі:

$$z = x\,tg\alpha - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha}. \quad (24)$$

Припустимо, що траєкторія руху проходить через точку цілі M (L, H):

$$H = x\,tg\alpha - \frac{gL^2}{2v_0^2 \cos^2\alpha}. \quad (25)$$

Перепишемо рівняння (25) у вигляді:

$$gL^2\,tg^2\alpha - 2Lv_0^2\,tg\alpha + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0. \quad (26)$$

Вираз (26) розглянемо як квадратне рівняння відносно параметра tgα. Для визначення критичного значення цього параметра використаємо аналітичні можливості мови maple. Для цього функцію (24) перепишемо у вигляді (25), використовуючи синтаксис мови maple. Далі визначимо похідну функції F по параметру tgα за допомогою оператора **solve**:

F:=g*L^2*tan(alpha)^2-2*L*v0^2*tan(alpha)+

+(g*L^2+2*H*v0^2)=0; (27)

$$F := gL^2 \tan(\alpha)^2 - 2Lv_0^2 \tan(\alpha) + gL^2 + 2Hv_0^2 = 0; \quad (28)$$

solve(F, tan(alpha)); (29)

$$\frac{2v_0^2 + 2\sqrt{v_0^4 - g^2L^2 - 2gHv_0^2}}{2gL}. \quad (30)$$

Вираз під знаком кореня квадратного повинен дорівнювати нулю (бо шукаємо критичне значення параметра). Розв'яжемо нове рівняння відносно швидкості вильоту v0 :

f:=v0^4-g^2*L^2-2*g*H*v0^2=0; (31)

$$f := v_0^4 - g^2L^2 - 2gHv_0^2; \quad (32)$$

solve(f,v0); (33)

$$\sqrt{gH + g\sqrt{H^2 + L^2}}. \tag{34}$$

Корінь розв'язку (33) надасть вираз для обчислення мінімальної швидкості вильоту контейнера. Для обчислення кута вильоту слід використати вирази (29) і (30) з врахуванням того, що функція (27) дорівнює нулю:

$$\textbf{tan(alpha)=1/2/g*(2*v0^2+2)/L}; \tag{35}$$

$$\tan(\alpha) = \frac{v_0^2 + 1}{gL}. \tag{36}$$

Остаточно одержимо такі формули для розрахунку моделі руху по параболічній траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною з початку координат до точки з координатами M (L, H):

$$v_0 = \sqrt{Hg + g\sqrt{L^2 + H^2}}\ ; \tag{37}$$

$$\alpha = \text{arctg}\left(\frac{v_0^2}{gL}\right). \tag{38}$$

В роботі [4] наведено інший спосіб обчислення початкової швидкості та кута вильоту тіла. Це вказує на достовірність одержаних результатів.

Було складено maple-програму (рис. 3) побудови таблиці значень початкових швидкостей руху контейнера, а також значень кутів вильоту контейнера відносно рівня горизонту за умови, що відомі висота H «палаючого» вікна від фундаменту будівлі, а також відстань L від імпульсного вогнегасника до стіни.

```
Digits := 6: g:=9.81:
 L := 5.:  # відстань до будівлі (м)
 for i from 3 to 9 do
H := 3*i:
 v0[i]:=sqrt(H*g + g*sqrt(L^2+H^2));
 alpha[i]:=arctan(v0[i]^2/g/L);
ugol[i]:=evalf(alpha[i]*180/2/Pi);
end do:
print(" відстань від пневмогармати до стіни", L,"м");
print("поверх","_№ 3","_№ 4","_№ 5",
"_№ 6","_№ 7","_№ 8","_№ 9");
print("швидкість",seq(v0[i],i=3..9));
print("радіани ",seq(alpha[i],i=3..9));
print(" градуси ",seq(ugol[i],i=3..9));
```

Рис. 3. Програма побудови таблиці значень швидкостей і кутів

У табл. 1 та табл. 2 наведено приклади результату виконання програми: значення початкових швидкостей і кутів вилітання контейнера, в залежності від відстані від пневматичної гармати до стіни.

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

Табл. 1. Відстань від пневматичної гармати до стіни 5 м

поверх	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
швидкість	13,7583	15,6605	17,3856	18,9696	20,4396	21,8159	23,1137
градуси	37,7363	39,3450	40,3913	41,1190	41,6518	42,0580	42,3772

Табл. 2. Відстань від пневматичної гармати до стіни 10 м

поверх	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8	№ 9
швидкість	14,8415	16,4608	18,0001	19,4572	20,8371	22,1472	23,3949
градуси	32,9970	35,0488	36,5776	37,7363	38,6342	39,3450	39,9193

Також було складено maple-програму побудови зображення будівлі та траєкторії руху контейнера. На рис. 4 наведено приклад виконання програми.

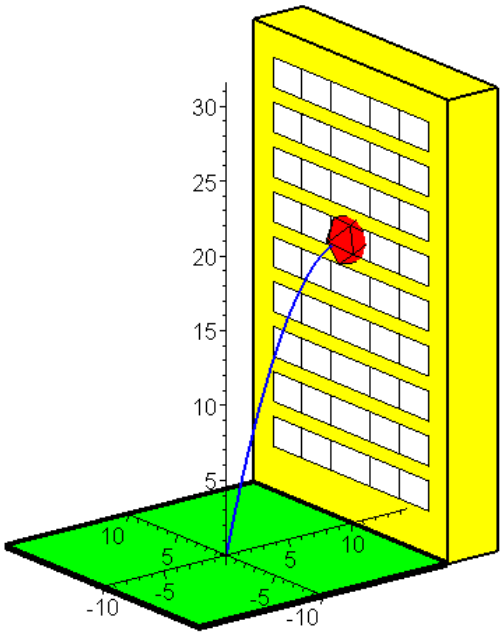


Рис. 4. Приклад моделювання будівлі і траєкторії контейнера

На практиці для зручного використання комп'ютерних описів траєкторій необхідні заздалегідь складені таблиці. Вони вказуватимуть значення кута вильоту контейнера залежно від координати необхідної точки потрапляння контейнера при відомій початковій швидкості вильоту. Для усунення незручності застосування таблиць і забезпечення оперативності розглянемо можливість використання планшета для оперативних розрахунків параметрів траєкторій доставки контейнера. А саме, планшета, де є можливість складати програми, наприклад, мовою Basic for Android-F.

Для цього оберемо вирази (37), (38) для опису v0 – початкової швидкості вильоту контейнера, та α – кута вильоту.

До речі, мову Basic було спроектовано для вирішення проблем, пов'язаних зі складністю «наукових» комп'ютерних мов. Вона призначалася для користувачів з простішими задачами, не стільки зацікавлених у швидкості обчислень, скільки у можливості використовувати комп'ютер для вирішення своїх конкретних задач.

На рис. 5 наведено фрагмент maple-програми, яка у разі необхідності просто перекладається мовою Basic for Android-F.:

```
g:=9.81: Digits := 5:
L := 20.: # відстань до будівлі (м)
for i from 1 to 9 do
H[i] := 3*i:
v0:=sqrt(H[i]*g + g*sqrt(L^2 + H[i]^2)):
alpha:=arctan(v0^2/g/L):
z:=x*tan(alpha) – g*x^2/(2*v0^2*cos(alpha)^2):
strim[i] := plot(z, x=0..L+0.5, scaling=CONSTRAINED,
color=red,thickness=3,linestyle=4):
end do:
zdn:=line([L,0], [L,29], color=yellow, thickness=5):
for i from 1 to 9 do
okna[i] := disk([L,3*i], 0.5, color=red, thickness=3)
end do:
display(seq(okna[i],i=1..9), seq(strim[i],i=1..9),
zdn, scaling=constrained); #, insequence=true);
```

Рис. 5. Фрагмент програми опису траєкторії руху контейнера залежно від положення точки цілі

На рис. 6 наведено результат виконання програми. Графічно зображено множину траєкторій контейнера залежно від положення точки цілі. Кольоровими точками показано положення віртуальних вікон, де можливе виникнення пожежі. Відстань від пневматичної гармати до стіни будівлі виражається значенням параметра L.

Складена програма реалізована у вигляді анімаційного фільму. Для цього в програму слід активізувати опцію **insequence=true**. Змінною величиною є параметр H – висота положення вікна. В процесі обчислень генеруються кадри траєкторії контейнера, накладених на профіль будівлі.

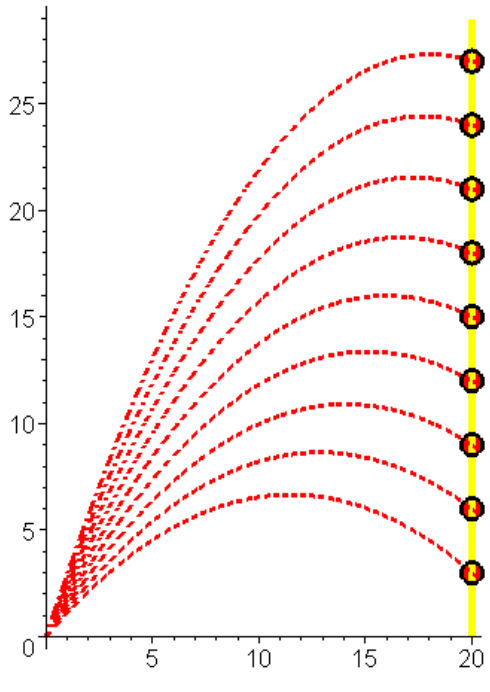


Рис. 6. Множина траєкторій з анімаційного фільму, які досягають віртуальних вікон будівлі

© А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

Використовуючи програму з рис. 3 можна скласти таблиці значень кутів і швидкостей при яких траєкторія досягає потрібного зображення віртуального вікна. Користувач планшета може обрати потрібні варіанти для використання.

8. Обговорення результатів способу моделювання траєкторій доставки контейнерів з вогнегасною речовиною

Отримані результати пояснюються можливістю знайти розв'язки диференціальних рівнянь для опису руху по параболічний траєкторії центра мас контейнера з вогнегасною речовиною. Початковими умовами обрано значення миттєвої стартової швидкості контейнера, а також значення кута (відносно горизонту) вильоту контейнера. Вказане визначає головну ідею роботи, за допомогою якої було вирішено поставлену мету роботи. В результаті одержано спосіб геометричного моделювання (параболічної) траєкторії доставки контейнера з вогнегасною речовиною до вікон верхніх поверхів будинків, де виникла пожежа. За умови, що у якості засобу доставки використовується пневматична гармата, для розрахунку дії якої необхідне значення миттєвої стартової швидкості контейнера, а також значення кута (відносно горизонту) вильоту контейнера. Зазначене реалізовано з використанням аналітичних виразів, одержаних за допомогою математичного процесора maple.

Особливості запропонованого методу і отриманих результатів в порівнянні з існуючими полягають в наступному. Для реалізації числових методів розв'язання диференціальних рівнянь необхідно узгодити вибір метода з точністю обчислень. При цьому виникають питання вибору величини кроків числових обчислень. В процесорі maple величини цих кроків апріорі зіставляються з необхідною точністю автоматично.

До головних результатів, які можуть враховуватись на практиці є установлений факт стосовно положення максимальної висоти переміщення тіла, коли початкова швидкість вильоту контейнера буде мінімально допустимою. А саме, максимум досягається завжди перед точкою цілі. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Ця властивість траєкторії з мінімальною початковою швидкістю руху повинна бути корисною для практики застосування пневматичної гармати. Але для її реалізації необхідно спроектувати нове пневматичне обладнання. Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі імпульсний вогнегасник повинен забезпечуватись засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром.

Так як початкова швидкість вильоту контейнера залежить від величини тиску стисненого повітря в пневматичній гарматі, то для практики пожежогасіння доцільними будуть дослідження, спрямовані на раціональне використання стисненого повітря в процесі оперативного застосування пневматичної гармати. Для економії цього ресурсу необхідно здійснювати «постріли» з мінімальним тиском для забезпечення необхідної швидкості вильоту контейнера. Тобто необхідно забезпечити мінімальну з можливих швидкостей вильоту контейнера, щоб контейнер досягнув заданої цілі (якщо це можливо для даного кута вильоту).

Розвиток проведеного дослідження доцільно спрямувати на моделювання ситуацій, які можуть виникнути в процесі ліквідації пожежі. Для такої дистанційної доставки контейнера слід враховувати фактор впливу бокового вітру на фор-

му траєкторії. Необхідно розробити комп'ютерну програму, яка б дозволила розрахувати траєкторію за умови наявності бокового вітру з відомою швидкістю.

Одержані результати є корисними і важливими, адже вони дозволяють започаткувати нову тактику гасіння пожеж у багатоповерхових будівлях. Крім одержаних в даній статті результатів, для її реалізації необхідне нове пневматичне обладнання. Для прицільної доставки вогнегасних речовин в осередок пожежі імпульсний вогнегасник повинен забезпечуватись засобами лазерного прицілювання, а також вимірювання кутів та далекоміром.

Кінцевою метою проведених досліджень стане моделювання ситуацій пожежогасіння висотних будівель з використанням сучасних планшетів.

9. Висновки

1. Описано кути вильоту контейнера, які забезпечують перетин настільної і навісної траєкторій в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі). Наведено формулу для визначення пари кутів вильоту контейнера. Показано, що зазначені траєкторії перетинаються в заданій точці цілі (у палаючому вікні будівлі). Розглянуто варіанти швидкостей вильоту та їм відповідні значення кутів вильоту. Для початкових швидкостей v0:=24, v0:=21 і v0:=19,5 одержано відповідні значення кутів вильоту. Цим прикладом показано, що існує початкова швидкість (v0:=20 умовних одиниць) вильоту контейнера, при якій настільна і навісна траєкторії поєднуються (ніби склеюються). Така властивість визначає мінімальну початкову швидкість вильоту.

2. Розраховано мінімальну стартову швидкість, здатну забезпечити досягнення палаючого вікна будівлі. Наведено формулу обчислення мінімальної початкової швидкості для досягнення палаючого вікні будівлі. Траєкторія з мінімальною початковою швидкістю має унікальну властивість. А саме, максимальна висота траєкторії переміщення завжди досягається перед точкою цілі. Це підтверджується таким прикладом, де *x1* –абсциса екстремуму параболи, а *x2* – абсциса розрахованої траєкторії.

Проілюструємо одержані результати з використанням цифр. Для цього, як приклад, оберемо відстань до стіни L=10 і три варіанти висот вікон h=9, h=18 і h=27. В результаті обчислень за наведеними формулами (19–22) отримали відповідні значення, які вказують на те, що траєкторія на прикінцевій фазі буде настільною. Це означає, що контейнер на кінцевій частині шляху завжди рухатиметься по навісній траєкторії до точки доставки. Так як початкова швидкість вильоту контейнера залежить від величини тиску стисненого повітря в пневматичній гарматі, то зазначене сприяє його раціональному використанню, що актуально для оперативного застосування пневматичної гармати.

3. Описано траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти над фундаментом за умови відомої відстані від імпульсного вогнегасника до стіни. Наведено формули для обчислення миттєвої швидкості вильоту контейнера, а також значення кута вильоту відносно рівня горизонту. Цим визначено параболічну траєкторію доставки контейнера до вікна заданої висоти H над фундаментом за умови відомої відстані L від імпульсного вогнегасника до стіни. У достовірності результатів можна переконатися за допомогою наведеної maple-програми побудови таблиці значень швидкостей і кутів. Розглянуто можливість використання планшета для оперативних розрахунків параметрів траєкторій доставки контейнера.

Література

1. 073: Fire Extinguisher Ball, just throw it in the fire! How to make it. URL: https://www.hamido.at/fire-ball/

2. Mizrahi J. Minimum velocity of a projectile in parabolic motion to pass above a fence. Making Physics Clear. URL: https://makingphysicsclear.com/minimum-velocity-of-a-projectile-in-parabolic-motion-to-pass-above-a-fence/

3. Mizrahi J. Ballistic motion – Maximum horizontal reach when firing from a height. Making Physics Clear. URL: https://makingphysicsclear.com/ballistic-motion-maximum-horizontal-reach-when-firing-from-a-height/

4. Mizrahi J. Ballistic problem – Maximum horizontal reach when firing toward a high place. Making Physics Clear. URL: https://makingphysicsclear.com/ballistic-problem-maximum-horizontal-reach-when-firing-toward-a-high-place/

5. Kamaldheeriya Maths easy. Derivation of Minimum Velocity and Angle to Hit a given point Projectile Motion #kamaldheeriya. 2020. YouTube. URL: https://www.youtube.com/watch?v=yR5C0XA8iI0

6. Miranda E. N., Nikolskaya S., Riba R. Minimum and terminal velocities in projectile motion. Revista Brasileira de Ensino de Física. 2004. Vol. 26. № 2. P. 125–127. doi: 10.1590/S0102-47442004000200007

7. Calculating minimum velocity of the projectile needed to hit target in parabolic arc. Game Development Stack Exchange. URL: https://gamedev.stackexchange.com/questions/17467/calculating-minimum-velocity-of-the-projectile-needed-to-hit-target-in-parabolic

8. At which point of the trajectory does projectile have minimum velocity. Doubtnut. URL: https://www.doubtnut.com/question-answer-physics/at-which-point-of-the-trajectory-does-projectile-have-minimum-velocity-643043562

9. Projectile motion – trajectory equation, definition and formulas. Engineering applications. URL: https://www.hkdivedi.com/2020/01/projectile-motion-trajectory-equation.html

10. Projectile Motion. Engineering Fundamentals. URL: https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/1/MapleDocument_1/Projectile%20Motion.pdf

11. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Спосіб складання таблиці кутів доставки вогнегасних речовин до багатоповерхової будівлі. The 5th International scientific and practical conference «European scientific congress» Barca Academy Publishing, Madrid, Spain. 2023. P. 54–60. URL: https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-european-scientific-congress-7-9-08-2023-madrid-ispaniya-arhiv/

12. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Про мінімальну початкову швидкість тіла, випущеного під кутом до горизонту. The. 9th International scientific and practical conference «Scientific research in the modern world» Perfect Publishing, Toronto, Canada. 2023. P. 155–160. URL: https://sci-conf.com.ua/xi-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-scientific-research-in-the-modern-world-24-26-08-2023-toronto-kanada-arhiv/

13. Калиновський А. Я., Поліванов О. Г. Розробка способу розрахунку параметрів доставки контейнера-вогнегасника до вікон висотних будинків. The 7th International scientific and practical conference «Innovations and prospects in modern science» SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2023. P. 68–76. URL: https://sciconf.

com.ua/ix-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-innovations-and-prospects-in-modern-science-28-30-08-2023-stokgolm-shvetsiya-arhiv/

A. Kalinovsky, *PhD, Associate Professor, Head of the Department*
L. Kutsenko, *DSc, Professor, Professor of the Department*
O. Polivanov, *Lecturer of the Department*
B. Kryvoshei, *PhD, Associate Professor*
O. Savchenko, *PhD, Associate Professor*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DELIVERY TRAJECTORY MODELING FIRE EXTINGUISHING CONTAINER TO THE UPPER FLOORS OF BUILDINGS

A method is presented for geometrically modeling the trajectory of delivery of a container with a fire extinguishing agent to the windows of the upper floors of houses where a fire occurred. The Typhoon-10 pulse fire extinguisher, which is used as a pneumatic gun, is used as a starting agent. This allows fire extinguishing agents to be delivered to the fire zone discretely, placed in a special container. To determine a rational trajectory for container delivery to the upper floors of the building, differential equations known from mechanics and their solutions were used. The resulting relationships connect the parameters characteristic of the points of the desired trajectory. An addition to these results will be the dependencies found in this work to describe the overhead and floor trajectories that intersect at the point of the burning window of the building. The values of the minimum starting speed for delivering a container to a predetermined window of a building on the required floor have also been determined. It is assumed that for calculations the height of the burning window (from the foundation of the building) is known, and the distance from the pulse fire extinguisher to the wall of the building is also known. Maple was compiled – a program for checking the obtained dependencies by constructing delivery trajectories using computer graphics. The results can be obtained in the form of a table, where the initial speeds and departure angles of the container depend on the floor number of the building. The conducted research is aimed at developing tactics for extinguishing fires in multi-storey buildings using the throwing method (or throwing, using Fire extinguisher Ball). This technology is characterized by the efficiency of fire extinguishing by fire and rescue units, regardless of the condition of the access roads to the building, as well as the existence of various obstacles directly in the yard in front of the house. All this will prevent the spread of fire due to its prompt localization and elimination.

Keywords: container, fire extinguishing agent, pulse fire extinguisher, point of intersection of trajectories, minimum starting speed

Reference:

1. 073: Fire Extinguisher Ball, just throw it in the fire! How to make it. Available at: https://www.hamido.at/fire-ball/

2. Mizrahi, J. Minimum velocity of a projectile in parabolic motion to pass above a fence. Making Physics Clear. Available at: https://makingphysicsclear.com/minimum-velocity-of-a-projectile-in-parabolic-motion-to-pass-above-a-fence/

3. Mizrahi, J. Ballistic motion – Maximum horizontal reach when firing from a height. Making Physics Clear. Available at: https://makingphysicsclear.com/ballistic-motion-maximum-horizontal-reach-when-firing-from-a-height/

4. Mizrahi, J. Ballistic problem – Maximum horizontal reach when firing toward a high place. Making Physics Clear. Available at: https://makingphysicsclear.com/ballistic-problem-maximum-horizontal-reach-when-firing-toward-a-high-place/

5. Kamaldheeriya Maths easy. (2020). Derivation of Minimum Velocity and Angle to Hit a given point Projectile Motion #kamaldheeriya, YouTube. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=yR5C0XA8iI0

6. Miranda, E. N., Nikolskaya, S., Riba, R. (2004). Minimum and terminal velocities in projectile motion. Revista Brasileira de Ensino de Física, 26(2), 125–127.

 © А. Я. Калиновський, Л. М. Куценко, О. Г. Поліванов, Б. І. Кривошей та ін.

doi: 10.1590/S0102-47442004000200007

7. Calculating minimum velocity of the projectile needed to hit target in parabolic arc. Game Development Stack Exchange. Available at: https://gamedev.stackexchange.com/questions/17467/calculating-minimum-velocity-of-the-projectile-needed-to-hit-target-in-parabolic

8. At which point of the trajectory does projectile have minimum velocity. Doubtnut. Available at: https://www.doubtnut.com/question-answer-physics/at-which-point-of-the-trajectory-does-projectile-have-minimum-velocity-643043562

9. Projectile motion – trajectory equation, definition and formulas. Engineering applications. Available at: https://www.hkdivedi.com/2020/01/projectile-motion-trajectory-equation.html

10. Projectile Motion. Engineering Fundamentals. Available at: https://www.maplesoft.com/content/EngineeringFundamentals/1/MapleDocument_1/Projectile%20Motion.pdf

11. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Sposib skladannia tablytsi kutiv dostavky vohnehasnykh rechovyn do bahatopoverkhovoi budivli. The 5th International scientific and practical conference «European scientific congress» Barca Academy Publishing, Madrid, Spain, 54–60. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18121

12. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Pro minimalnu pochatkovu shvydkist tila, vypushchenoho pid kutom do horyzontu. The 9th International scientific and practical conference «Scientific research in the modern world» Perfect Publishing, Toronto, Canada, 155–160. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18191

13. Kalynovskyi, A. Ya., Polivanov, O. H. (2023). Rozrobka sposobu rozrakhunku parametriv dostavky konteinera-vohnehasnyka do vikon vysotnykh budynkiv. The 7th International scientific and practical conference «Innovations and prospects in modern science» SSPG Publish, Stockholm, Sweden, 68–76. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18190

Надійшла до редколегії: 21.09.2023
Прийнята до друку: 08.11.2023

UDC 614.8

N. Lysak, *Graduate Student, Teacher of the Department (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)*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF A FIRE-PROOF COATING CONTAINING SILICA FOR POLYSTYRENE

The possibility of applying a silica-containing coating to the surface of XPS extruded polystyrene foam, which is characterized by a high degree of flammability, was evaluated. The effect of the content and concentration (11, 22, 44 and 85 %) of orthophosphate acid on the optical properties of silicic acid sols obtained by the exchange reaction between aqueous solutions of liquid glass and acetic acid was studied. The fact of incorporation of orthophosphate acid into the gel structure was confirmed by the results of acid-base titration with a sodium hydroxide solution of the intermicellar liquid isolated as a result of gel syneresis. Using an optical microscope, the structure of the polystyrene film coating after treatment with orthophosphate and sulfuric acid solutions was investigated. In both cases, the effect of an increase in the pore area and a general increase in the looseness of the surface was noted, which can help reduce its hydrophobicity and improve adhesion to the coating. The increase in hydrophilicity of the surfaces of polystyrene films after treatment with acids was also confirmed by the flatter, non-spherical shape of the drops of the composition on them. The structure of the obtained coatings on polystyrene films was analyzed. The similarity of the directions of the cracks in the case of treatment of the films with solutions of both acids was noted, and an assumption was made about the presence of uniform deformation stresses during gel shrinkage. A microscopic study of coatings on the surface of extruded polystyrene foam was conducted, and a positive effect of orthophosphate acid on the density of their structure was established. It was determined that the optimal solution for obtaining a uniform coating is the modification of the sol with the help of a 22 % solution of orthophosphate acid. Schemes of the interaction of the silica coating and the polystyrene base in cases of electrostatic interaction and in the case of the formation of covalent bonds between the coating and the polystyrene surface are proposed.

Keywords: liquid glass, silica-containing coatings, fire protection of building materials, extruded polystyrene foam

1. Introduction

One of the most urgent problems today is energy saving, among the key aspects of which should be highlighted the preservation of heat in houses and apartments. To insulate facades, roofs, plinths and foundations of buildings, heat-insulating materials are used, which usually have a porous structure and are characterized by a low coefficient of thermal conductivity.

Among such construction materials, polystyrene foam has become widely used, which is waterproof, easy to process and cheap.

According to the state standards of Ukraine, harmonized with European standards, there are two types of expanded polystyrene: expanded (or foamed) and extruded, labeled as EPS (DSTU B EN 13163:2012) and XPS (DSTU B EN 13164:2019), respectively. Since EPS polystyrene belongs to building materials of low and moderate flammability (groups G_1–G_2), it is more often used for facade insulation. XPS polystyrene has a denser monolithic structure, is stronger compared to EPS polystyrene and frost-resistant, which is why it is called a new generation heat-insulating material.

Extruded polystyrene foam is used to insulate surfaces where there are high requirements for mechanical stability and adhesion of heat-insulating boards to the base on which they are fixed.

Despite high energy efficiency, one of the main disadvantages of polystyrene XPS is a high degree of flammability – it is classified as materials with medium and high

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha

flammability (groups G_3-G_4). Of course, certain types of polystyrene contain flame retardant additives, but such brands have a higher price, so they are not always in demand among consumers. In addition, flame retardants often contain halogens and emit toxic substances during combustion.

In view of the above, the study of ways to increase the fire safety of highly flammable heat-insulating materials is relevant.

2. Analysis of literary data and formulation of the problem

The analysis of recent publications shows that effective polystyrene fire-retardant coatings are compositions based on SiO_2 gels obtained from organosilicon precursors by sol-gel technology, with the addition of phosphorus- and nitrogen-containing flame retardant agents [1–3], but the release of toxic substances into the atmosphere is a big problem during their disposal or fire. In addition, it should be noted that the coatings on an organic basis, proposed by the authors of the works [1–3], have a high cost and a high smoke-generating capacity, compared to the coatings formed on the basis of inorganic substances.

Adhesion of the coating to the base material is of great importance [4]. It is known that polystyrene has adsorption properties, which, in particular, is used during the manufacture of synthetic ion exchange resins. This is stated in the paper [5], where the use of such adsorbents for the purification of wastewater from dyes is considered, but other fields of application are not described. The results of numerous studies on the absorptive capacity of polystyrene show that the adsorption of the polymer can be caused by van der Waals interactions, capillary condensation, the formation of a Langmuir monolayer, and the filling of micropores [5–7]. The works [5–7] are of great theoretical and practical importance, at the same time we should not forget that it will not be possible to achieve the adhesive strength determined only by the surface forces described by the authors of these publications. Works [8–9] proposed a method of modifying the surface of polystyrene by introducing compounds that give the surface a positive or negative charge. In work [8], for example, vinylpyridine and cetyltrimethylammonium bromide were used as surfactants, in work [9] polyvinylpyrrolidone and polyacrylic acid, and then a silicic acid sol obtained by hydrolysis of tetraethylorthosilicate was applied. But it should be taken into account that under the influence of meteorological conditions, partial compensation of charges on the surface of the coating and polystyrene foam may occur, which leads to a significant decrease in the adhesion of the coating to the base. Therefore, publications devoted to the issue of fixing coatings on the surface of the base by chemical transformation are of great interest.

The results of work [10] deserve attention, where the structural and chemical modification of the polystyrene surface was investigated during treatment with a solution containing a phosphate buffer solution (Na_2HPO_4 and KH_2PO_4, pH 7,39) and sodium chloride. The authors assumed that it is the phosphate ions adsorbed on the polymer surface and the corresponding value of the ionic strength that contribute to the photooxidation process, the scheme of which is shown in Fig. 1. Adsorption of ionic groups can lead to the extension of polymer chains due to electrostatic repulsion and subsequent hydration.

The appearance of charged particles on the surface of polystyrene can contribute to the strengthening of the electrostatic interaction between the organic matrix and sols of silica precursors, which also carry a positive charge in an acidic medium, and a negative charge in an alkaline one [11]. However, adsorption and electrostatic attraction cannot ensure reliable and strong adhesion between the coating and the substrate material.

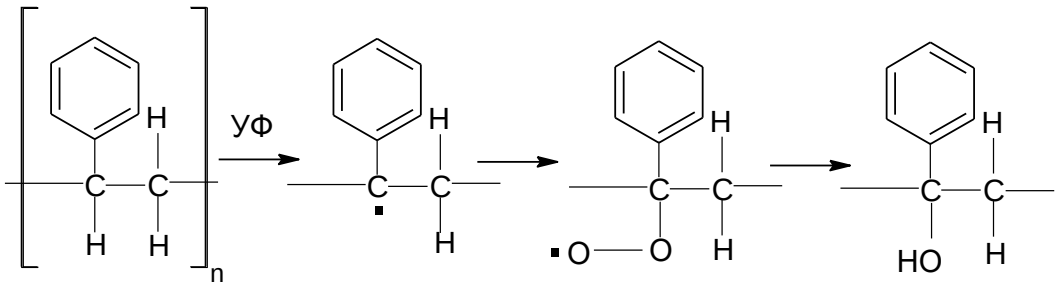


Fig. 1. Scheme of photooxidation of polystyrene after treatment with a phosphate buffer solution

It is known that the silica-containing coating is much better retained on the surface if covalent bonds with functional groups (hydroxyl, carboxyl) are formed. Structurally, polystyrene is a non-polar vinyl polymer, the main chain of which contains phenyl groups (C_6H_5-) as substituents. To improve adhesion, chemical modification of polystyrene with the formation of functional groups or adsorption immobilization of certain substances on the surface of polystyrene is necessary.

Among the methods of formation of functional groups on the surface of polystyrene, it is possible to consider the hydration of the vinyl fragment, the catalysts of the process should be strong acids. The results of the work of the author of the publication [12], where the hydration of polystyrene was carried out in the medium of sulfuric acid and perchloric acid at 25 °C, deserve attention (Fig. 2).

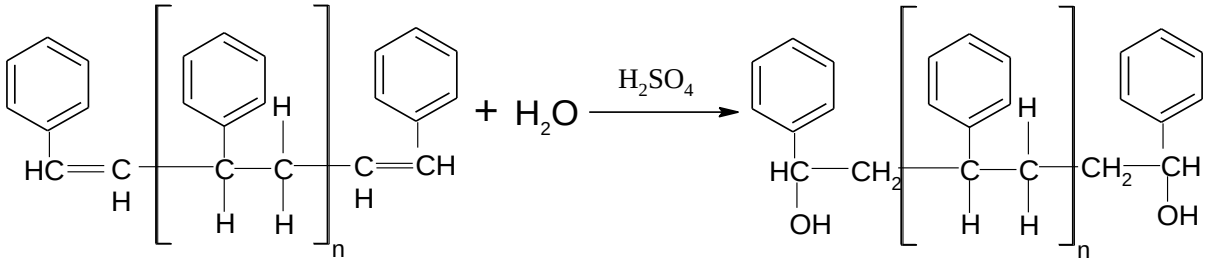


Fig. 2. Scheme of hydration of final fragments of polystyrene under the action of sulfuric acid

Under the action of these acids, the surface of polystyrene is somewhat activated, but the reverse process is likely during the action of fire. In addition, the percentage of release of toxic gases increases. On the other hand, the authors of the work [13] investigated that an acidic medium is favorable for the development of pathogenic microorganisms, viruses, fungi, and, taking this into account, the preliminary treatment of polystyrene with an acid solution is questioned.

It is known that orthophosphate acid is able to polymerize, especially in the presence of an alkaline component. Therefore, it is often used as a binding component in refractory concrete compositions, as well as during the pressing of refractory products for various purposes. Under the influence of temperature, the phosphate anion is able to integrate into the structure of the siloxane framework and form a heat-resistant silicophosphate chain.

Orthophosphate acid can also be used to hydrate the double bond, but stricter conditions are required: high pressure and heat, which can cause destruction of the material [14]. Therefore, it seems appropriate to study in more detail the influence of the content of orthophosphate acid on the changes in the properties of the silica fire-resistant coating and its fixation on the polystyrene base.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha

3. The purpose and tasks of the research

The purpose of the work is to substantiate the composition of the silica composition as a basis for the fire-resistant coating of heat-insulating polystyrene building materials.

To achieve the set goal, the following scientific tasks must be solved:

– to investigate the effect of the content and concentration of orthophosphate acid on the physical and chemical properties of silicic acid sol;

– to investigate the possibility and determine the ways of fixing the protective coating on the surface of polystyrene.

4. Research materials and methods

The object of research is silica sols based on liquid glass. The subject of research is the processes that occur during gelation in sols based on liquid glass and thermal destruction in case of contact with flames.

The main hypothesis of the research is the assumption that the effect of strong mineral acids can activate the surface of polystyrene to increase the probability of covalent bonds formation with the silicate coating.

Silicic acid sol was obtained as a result of the exchange reaction between sodium silicate (liquid glass) and acetic acid. A solution of orthophosphate acid with a concentration of 11, 22, 44 and 85 % was used as a modifying additive. The sol was applied to the surface of XPS extruded polystyrene foam samples measuring 5x5x3 cm using a bath method. Application of 2–3 layers of coating was carried out after drying the previous layer in the thermal shock mode at 80 °C in a drying cabinet. At the same time, changes in the optical density of the sols over time were determined using a KFK-2 photocolorimeter. Distilled water was used as a comparison solution.

To determine the mass fraction of orthophosphate acid embedded in the gel structure, an acid-base titration of the intermicellar fluid released as a result of gel syneresis was performed with a 0.001 M sodium hydroxide solution using phenolphthalein and methyl orange as indicators.

The influence of surface treatment of polystyrene with acids was determined on samples of polystyrene film with a smooth, dense surface. The samples were kept for a day in solutions of concentrated orthophosphate and sulfuric acids, after which a silicic acid sol was applied to the surface of the film by the bath method.

The structure and characteristics of the coating on the polystyrene foam surfaces were evaluated using a Digital Microscope S10 1000x.

5. Study of the influence of orthophosphate acid on the physical and chemical properties of experimental sols

The dependence of the change in the optical density of the experimental silicic acid sols over time on the concentration of the orthophosphate acid used is shown in Fig. 3. With an increase in the concentration of orthophosphate acid, an increase in the rate of change in the optical density of sols over time is observed: in the case of using 85 % H_3PO_4, the optical density of the sols is maximum.

The dependence of the viability of experimental sols on the concentration of orthophosphate acid is shown in Fig. 4. The figure shows that an increase in concentration has an almost linear effect on the increase in survival time. The sol without the addition of orthophosphate has a slightly different structure of the siloxane framework and is therefore not shown in the graph.

The use of concentrated acid (85 %) leads to a sharp increase in the acidity of the sol, therefore, an acid variant of polycondensation of silicic acid with the formation of clathrates is realized, which proceeds slowly enough within 3 days.

It was determined how completely orthophosphate acid is incorporated into the siloxane framework, for which the pH and mass fraction of the acid in the intermicellar liquids above the experimental gels solidified in closed boxes were determined (Table 1). The mass fraction of the acid that remained in the intermicellar liquid, which was released as a result of the syneresis of the silicic acid gel with the addition of 85 % orthophosphate acid, was determined by titration with an alkali solution in the presence of phenolphthalein and methyl orange indicators.

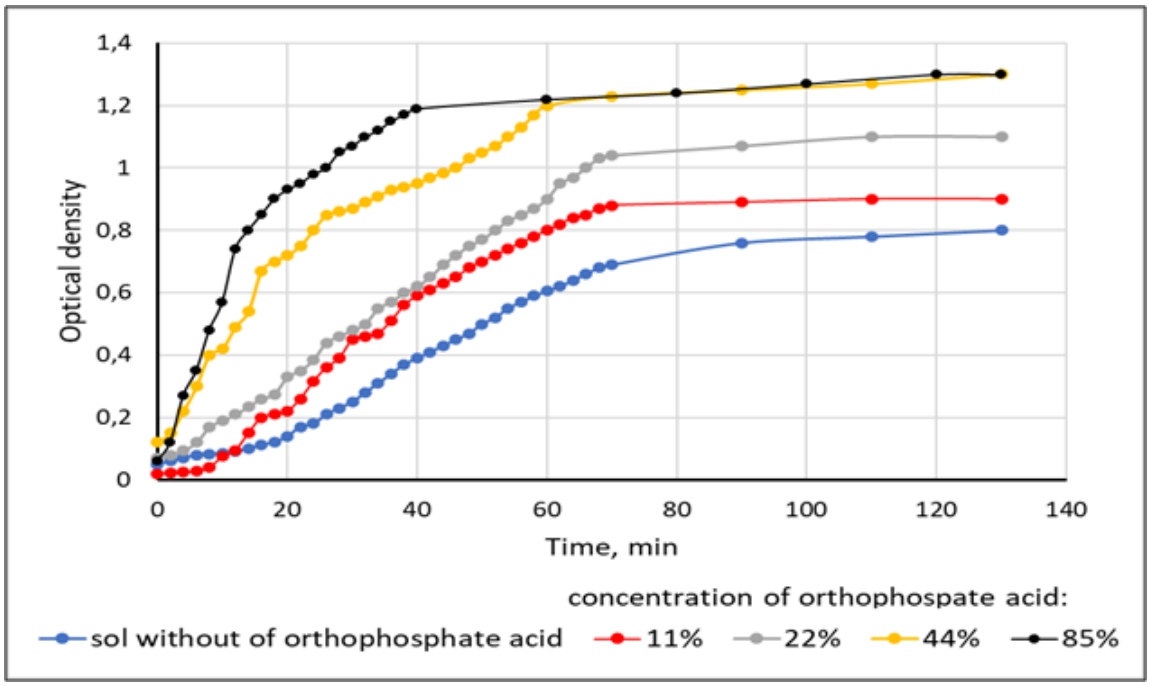


Fig. 3. Dependence of the change in the optical density of the experimental silicic acid sols over time on the concentration of the orthophosphate acid used

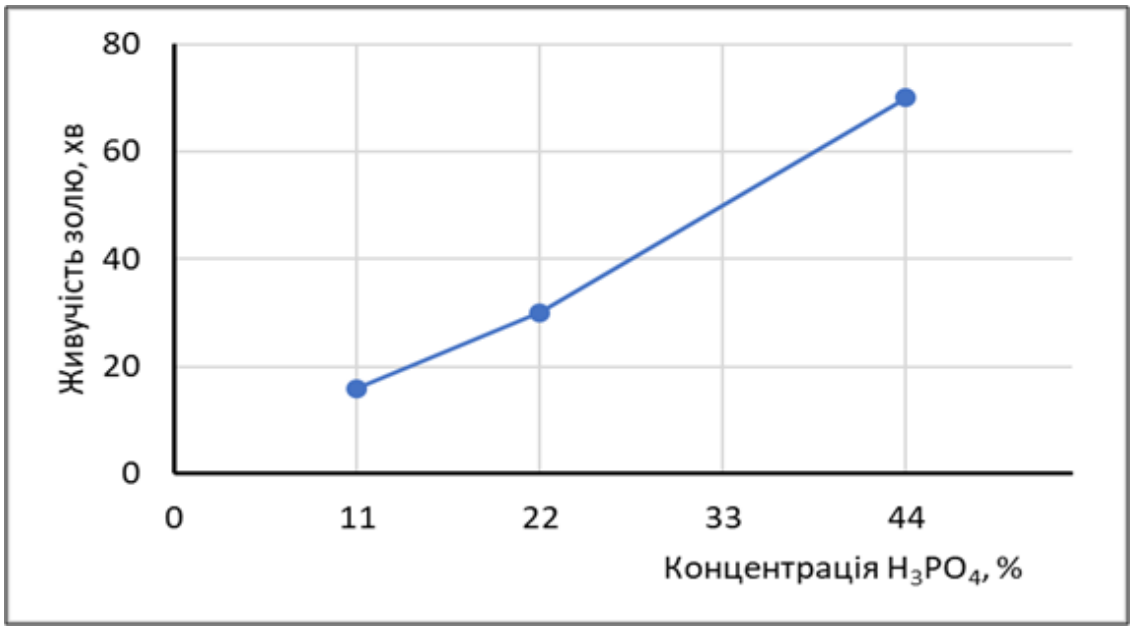


Fig. 4. Dependence of the survivability of silicic acid sols on the concentration of orthophosphate acid

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha

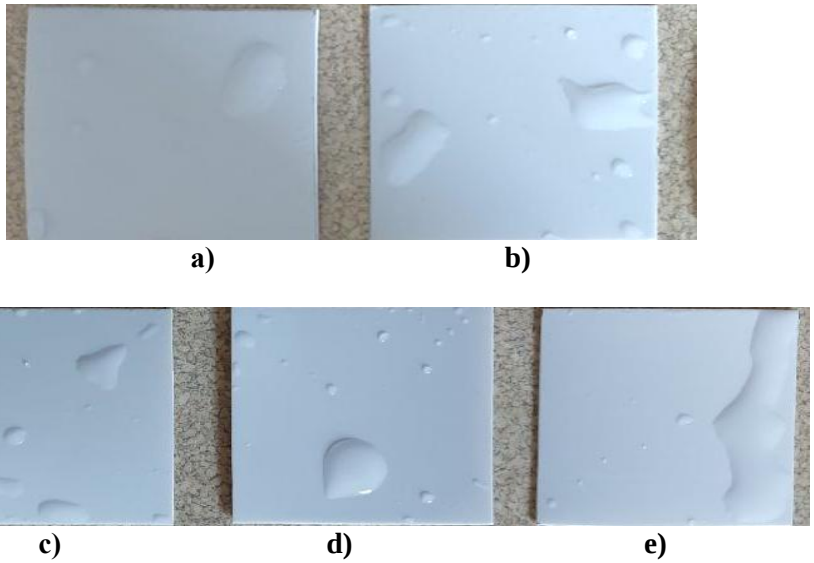
Tab. 1. Results of determining the pH of intermicellar liquids over gels with different content of orthophosphate acid

№	H_3PO_4 concentration, %	pH
1	0	5
2	11	5,5
3	22	5
4	44	4
5	85	3

It was established that the mass fraction of orthophosphate acid incorporated into the siloxane framework is 97,1 %.

6. Study of the possibility of coating the surface of polystyrene

The results of surface treatment of polystyrene with orthophosphate and sulfuric acids and subsequent application of the composition are shown in fig. 5.



a) **b)** **c)** **d)** **e)**

Fig. 5. Photo of drops of the composition on the surface of polystyrene films: a – untreated film; b–e – films kept for a day in solutions of orthophosphate (b, d) and sulfate (c, e) acids. After etching: b, c – washed with running water; d, e – unwashed

On the untreated polystyrene film, the drop has a shape closer to spherical, which indicates the hydrophobicity of the surface. After treating the surface with acids, the drops acquire a flatter shape, that is, the wettability of the surface increases. It is possible to clearly observe the spreading of the composition on the surface of the polystyrene film treated with sulfuric acid without further washing (Fig. 5, e), which demonstrates the maximum positive effect of H_2SO_4 on increasing the hydrophilicity of the polystyrene surface.

The microstructure of the surfaces of polystyrene films after treatment with acids is shown in Fig. 6.

Analysis of the microstructure of the films shows that treatment of polystyrene films with acids makes their surface more voluminous and porous. Despite the fact that sulfuric acid is stronger compared to orthophosphate, treatment with them gave similar effects. The images clearly show an increase in the total area of indentations on the surface of acid-treated polystyrene films compared to the untreated sample. It should also be noted that washing the surface of the film with running water after treatment with acids did not have a decisive effect on modifying the structure of the polystyrene surface.

The coating obtained on the acid-treated polystyrene films held slightly better than on the untreated sample, although the purpose of this experimental study on the control

samples was not to achieve a sufficient level of adhesion. The coatings obtained on the processed samples had cracks, and attention should be paid to their uniform branching, which suggests the presence of uniform deformation stresses during gel shrinkage.

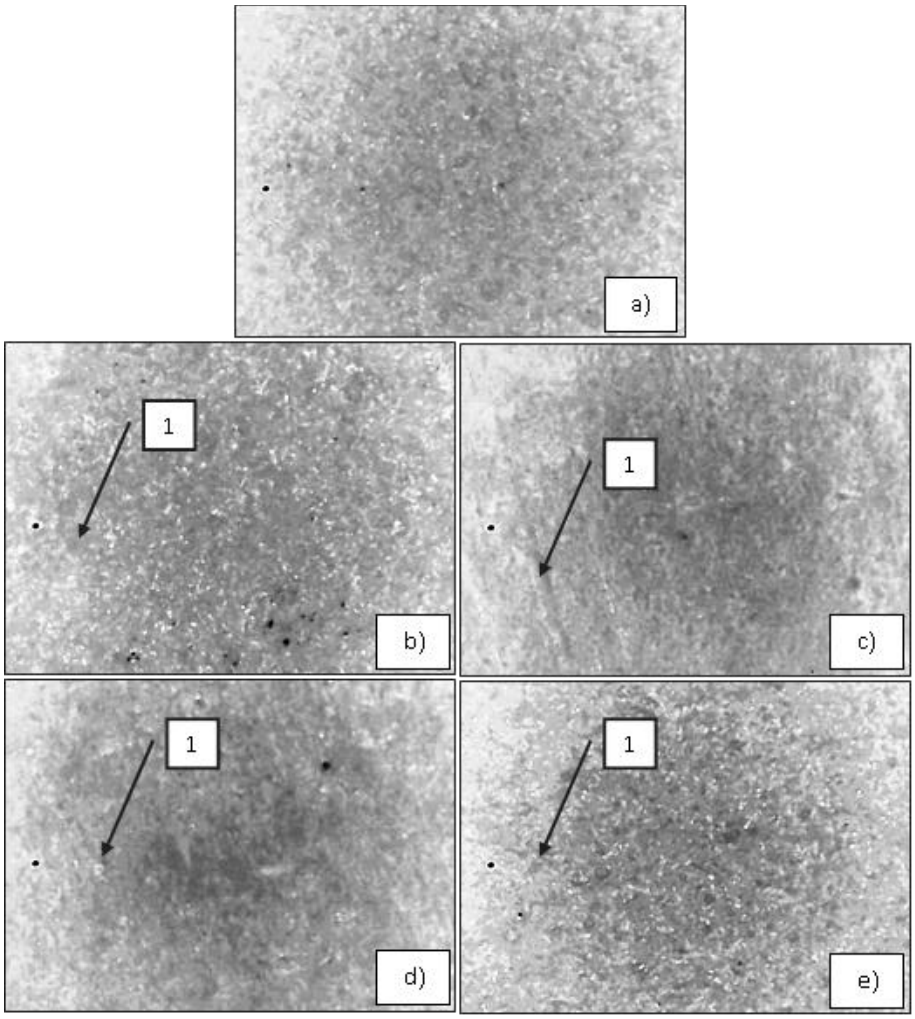


Fig. 6. Microstructure of the surfaces of polystyrene films treated with solutions of sulfuric and orthophosphate acids: a – untreated film; b–e – films kept for a day in solutions of orthophosphate (b, d) and sulfate (c, e) acids. After etching: b, c – washed with running water; d, e – unwashed, 1 – indentations formed after treatment with acids

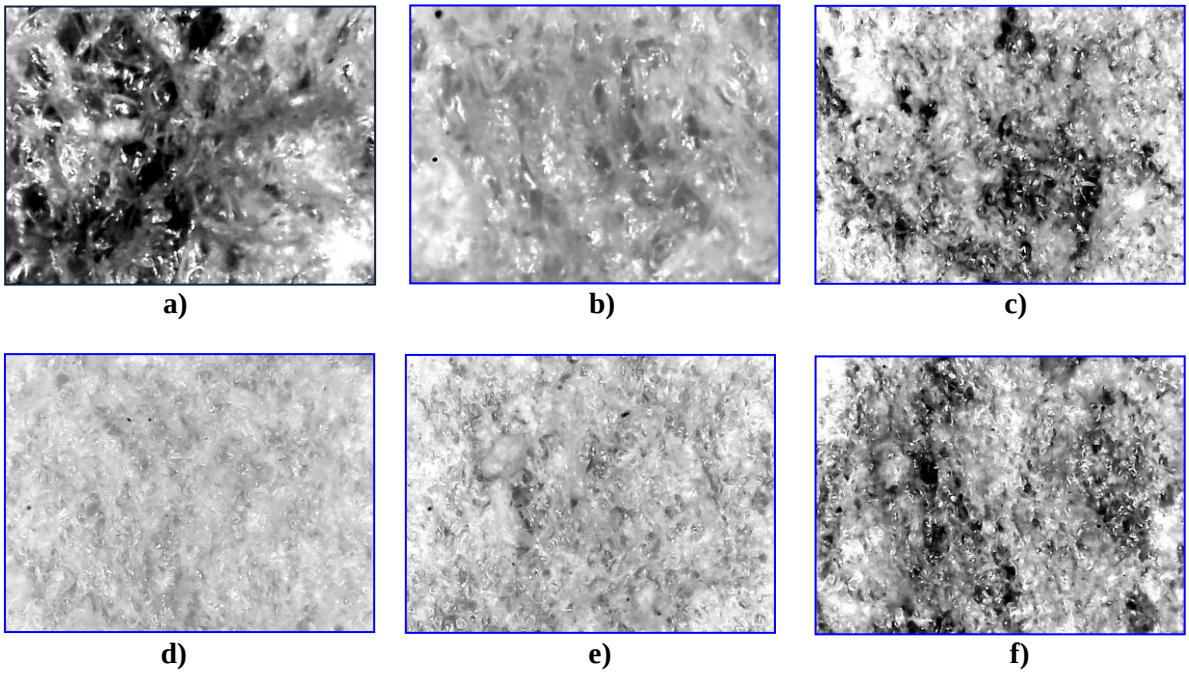
The microstructure of coatings obtained on the surfaces of extruded polystyrene foam based on compositions with different concentrations of orthophosphate acid is shown in Fig. 7.

We observe that the coatings obtained on the basis of compositions with the addition of orthophosphate acid (Fig. 7, c–f) are denser compared to those obtained without the use of additives (Fig. 7, b). The most homogeneous in thickness are coatings based on compositions with the addition of orthophosphate acid with a concentration of 11 and 22 %.

Polystyrene adsorbs phosphate ions, and its surface is negatively charged. Due to the electrostatic attraction of the positively charged silicic acid sol to the surface, better adhesive characteristics and fixing of the protective coating on the surface of the material are ensured, so it is possible to assume the scheme of the electrostatic interaction of the coating and the polystyrene surface shown in Fig. 9.

Based on the conclusions made, the following chemical mechanism of the formation of a silica-containing coating on the surface of polystyrene can be assumed, as shown in Fig. 10.

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha



a) **b)** **c)**

d) **e)** **f)**

Fig. 7. Microstructure of the surface of extruded polystyrene: a – without coating; coatings based on compositions: b – without addition of orthophosphate acid and with addition of orthophosphate acid of the appropriate concentration; c – 11 %, d – 22 %, e – 44%, f – 85 %

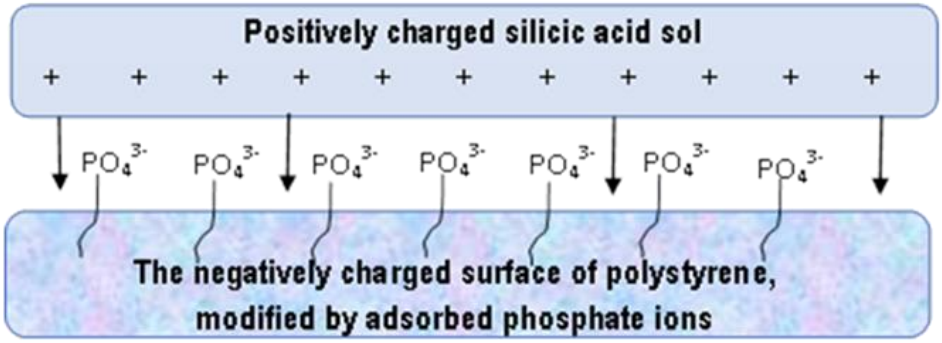


Fig. 9. Scheme of the electrostatic principle of adhesion of a silica-containing coating on the surface of polystyrene

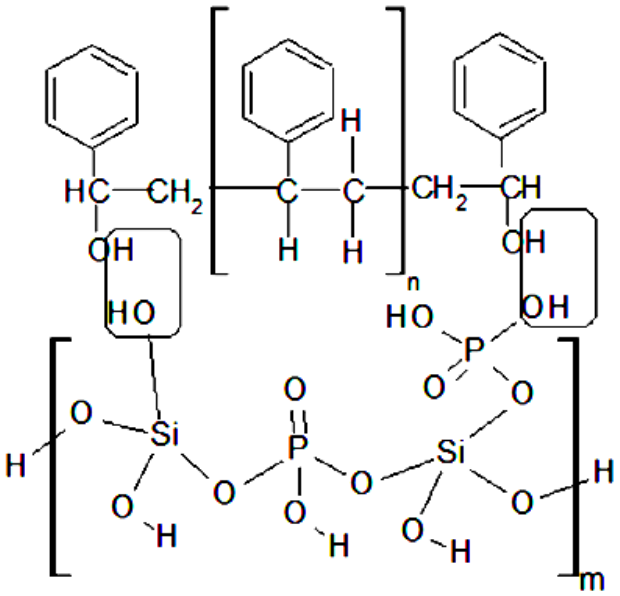


Fig. 10. Scheme of the formation of a silica-containing coating on the surface of polystyrene

It can also be assumed that the orthophosphate will covalently bind the ≡Si-OH groups of the gel and the –CH2OH- group of polystyrene and be incorporated into the siloxane structure.

7. Discussion of the results of the study of the impact of orthophosphate acid on the physicochemical properties of experimental sols

Analysis of the dependence of the optical density of silicic acid sols with H_3PO_4 additives showed that with an increase in the concentration of orthophosphate acid, the time of solidification of the sol increases, but the time of latent coagulation decreases. Just before the beginning of hidden coagulation, when colloidal particles begin to thicken, it is advisable to apply sol to the surface of the building material in order to obtain a uniform coating. An interesting observation is that the solidification time of the sol with H_3PO_4 of 11 % concentration is the shortest among those studied. On the other hand, it is known that it is precisely at a pH of ~5,5 that the rate of silica gel formation is maximal (the pH value in the intermicellar liquid above the solidified gel is exactly 5,5). Taking into account the time of onset of hidden coagulation and the durability of the composition, which will be acceptable and satisfactory for applying a coating to the surface of the building material, it is possible to give preference to the use of sol with the addition of a 44 % solution of orthophosphate acid.

However, the study of the microstructure of coatings on the surface of extruded polystyrene shows that greater homogeneity in thickness can be achieved by adding a solution of orthophosphate acid with a concentration of 11 or 22 % to the sol. Taking into account the fact that the survivability of sols with 11 % H_3PO_4 solution is the lowest among those studied, it is optimal to modify the sols using a solution of orthophosphate acid with a concentration of 22 %.

Calculations of the mass fraction of orthophosphate acid in the gel structure suggest that orthophosphate acid forms covalent bonds with silanol groups. However, it should be noted that not all orthophosphate acid is incorporated into the structure, a certain amount of it is neutralized by the action of the alkali formed as a result of the hydrolysis of sodium silicate.

Treatment of the polystyrene surface with acids has a positive effect – the hydrophilicity and wettability of the surface increases. Considering the higher heat resistance of silicophosphate compositions compared to silicosulfate compositions, it is more expedient to use orthophosphate acid for surface treatment.

However, under the influence of certain conditions, partial compensation of charges on the surface of the coating and polystyrene foam may occur, which will lead to a significant decrease in the adhesion of the coating to the base (Fig. 9), so the option of more reliable fixation of the coating on the surface of polystyrene should be considered, namely due to the formation of covalent bonds connections (Fig. 10). Then it will be more effective to treat the surface with sulfuric acid, which contributes to the formation of hydroxyl groups that will covalently bind the applied coating and improve adhesion. It can be asserted that in the case of application of silicic acid sol on the surface of polystyrene and subsequent heating, water molecules condense between the ≡Si-OH groups of the gel and $–CH_2OH$ of polystyrene, resulting in the formation of covalent bonds.

It should be noted that the key to conducting the chemical polycondensation reactions shown in Scheme 10 is the preservation of the conditions for the electrostatic fixation of the coating on the surface of polystyrene.

It remains unclear how stable the bond between the coating and the polystyrene

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha

base will be under conditions of high temperatures or open fire, so further studies are expected to study the influence of the composition of silicate sol on the stability of fire-resistant coatings and changes in the fire resistance of extruded polystyrene.

8. Conclusions

1. The effect of the content and concentration of orthophosphate acid on the properties of silicic acid sol was investigated spectrophotometrically. The density and structure of coatings on the surface of extruded polystyrene were evaluated using a microscopic study. It was established that the addition of a 22 % H_3PO_4 solution is optimal for obtaining a uniform coating on the surface of polystyrene foam.

2. The positive effect of treating the surface of polystyrene with solutions of sulfuric and orthophosphate acids to reduce hydrophobicity and improve the adhesive characteristics of the silica-containing coating was noted. Schemes of the interaction of the silica coating and the polystyrene base in cases of electrostatic interaction and in the case of the formation of covalent bonds between the coating and the polystyrene surface in places of partial destruction of the double bonds of the polymer are proposed.

References

1. Zhu, Z., Xu, Y., Wang, L., Xu, S., Wang, Y. (2017). Highly Flame Retardant Expanded Polystyrene Foams from Phosphorus–Nitrogen–Silicon Synergistic Adhesives. Industrial & Engineering Chemistry Research, 56(16), 4649–4658. doi: 10.1021/acs.iecr.6b05065

2. Zhao, W., Zhao, H., Cheng, J., Li, W., Zhang, J., Wang, Y. (2022). A green, durable and effective flame-retardant coating for expandable polystyrene foams. Chemical Engineering Journal, 440, 135807. doi: 10.1016/j.cej.2022.135807

3. Li, M., Yan, Y., Zhao, H., Jian, R., Wang, Y. (2020). A facile and efficient flame-retardant and smoke-suppressant resin coating for expanded polystyrene foams. Composites Part B: Engineering, 185, 107797. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107797

4. De Azevedo, A. R. G., França, B. R., Alexandre, J., Marvila, M. T., Zanelato, E. B., De Castro Xavier, G. (2018). Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. Journal of Building Engineering, 19, 342–348. doi: 10.1016/j.jobe.2018.05.026

5. Greluk, M., Hubicki, Z. (2013). Evaluation of polystyrene anion exchange resin for removal of reactive dyes from aqueous solutions. Chemical Engineering Research and Design, 91(7), 1343–1351. doi: 10.1016/j.cherd.2013.01.019

6. Zhang, Q., Zhang, Z., Teng, J., Huang, H., Peng, Q., Jiao, T., Hou, L., Li, B. (2015). Highly efficient phosphate sequestration in aqueous solutions using nanomagnesium hydroxide modified polystyrene materials. Industrial & Engineering Chemistry Research, 54(11), 2940–2949. doi: doi.org/10.1021/ie503943z

7. Du, C., Jia, J., Liao, X., Zhou, L., Hu, Z., Pan, B. (2020b). Phosphate removal by polystyrene anion exchanger (PsAX)-supporting Fe-loaded nanocomposites: Effects of PsAX functional groups and ferric (hydr)oxide crystallinity. Chemical Engineering Journal, 387, 124193. doi: 10.1016/j.cej.2020.124193

8. Wang, S., Zhang, M., Wang, D., Zhang, W., Liu, S. (2011). Synthesis of hollow mesoporous silica microspheres through surface sol–gel process on polystyrene-co-poly(4-vinylpyridine) core–shell microspheres. Microporous and Mesoporous Materials, 139(1–3), 1–7. doi: 10.1016/j.micromeso.2010.10.002

9. Zou, H., Wu, S., Ran, Q., Shen, J. (2008). A simple and Low-Cost method for

the preparation of monodisperse hollow silica spheres. Journal of Physical Chemistry C, 112(31), 11623–11629. doi: 10.1021/jp800557k

10. Mielczarski, J., Jeyachandran, Y., Mielczarski, E., Rai, B. (2011). Modification of polystyrene surface in aqueous solutions. Journal of Colloid and Interface Science, 362(2), 532–539. doi: 10.1016/j.jcis.2011.05.068

11. Skorodumova, O., Tarakhno, O., Chebotaryova, O., Hapon, Y., Emen, F. (2020). Formation of fire retardant properties in elastic silica coatings for textile materials. Materials Science Forum, 1006, 25–31. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.25

12. Cox, R. A. (1999). Styrene hydration and stilbene isomerization in strong acid media. An excess acidity analysis. Canadian Journal of Chemistry, 77(5–6), 709–718. doi: 10.1139/v99-028

13. Bryukhanov, A. L., Vlasov, D. Y., Maiorova, M. A., Tsarovtseva, I. M. (2021). The role of microorganisms in the destruction of concrete and reinforced concrete structures. Power Technology and Engineering, 54(5), 609–614. doi: 10.1007/s10749-020-01260-5

14. Davarnejad, R. (2021). Alkenes – Recent advances, new perspectives and applications. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.94671

Н. М. Лисак, *аспірант, викл. каф.*
О. Б. Скородумова, *д.т.н., професор, проф. каф.*
А. А. Чернуха, *к.т.н., доцент, доц. каф.*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

РОЗРОБКА ВОГНЕЗАХИСНОГО КРЕМНЕЗЕМВМІСНОГО ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОЛІСТИРОЛУ

Оцінено можливість нанесення кремнеземвмісного покриття на поверхню екструдованого пінополістиролу марки XPS, що характеризується високим ступенем легкозаймистості. Досліджено вплив вмісту та концентрації (11, 22, 44 та 85 %) ортофосфатної кислоти на оптичні властивості золів кремнієвої кислоти, добутих реакцією обміну між водними розчинами рідкого скла та оцтової кислоти. Факт вбудовування ортофосфатної кислоти в структуру геля підтверджено результатами кислотно-основного титрування розчином натрій гідроксиду інтерміцелярної рідини, виділеної внаслідок синерезису гелю. За допомогою оптичного мікроскопа досліджено структуру покриття полістирольної плівки після обробки розчинами ортофосфатної та сульфатної кислот. В обох випадках відзначено ефект зростання площі пор та загальне збільшення рихлості поверхні, що може сприяти зменшенню її гідрофобності та покращенню адгезії до покриття. Підвищення гідрофільності поверхонь полістирольних плівок після обробки кислотами також підтверджувалося більш плоскою, несферичною формою крапель композиції на них. Проаналізовано структуру отриманих покриттів на полістирольних плівках. Зауважено схожість направленості тріщин у випадку обробки плівок розчинами обох кислот та висунуто припущення про наявність рівномірних деформаційних напружень під час усадки гелю. Проведено мікроскопічне дослідження покриттів на поверхні екструдованого пінополістиролу, встановлено позитивний вплив ортофосфатної кислоти на щільність їхньої структури. Визначено, що оптимальною для отримання однорідного покриття є модифікація золю за допомогою 22 %-го розчину ортофосфатної кислоти. Запропоновано схеми взаємодії кремнеземистого покриття та полістирольної основи у випадках електростатичної взаємодії та у разі утворення ковалентних зв'язків між покриттям та полістирольною поверхнею.

Ключові слова: рідке скло, кремнеземвмісні покриття, вогнезахист будівельних матеріалів, екструдований пінополістирол

Література

1. Zhu Z., Xu Y., Wang L., Xu S., Wang Y. Highly Flame Retardant Expanded Polystyrene Foams from Phosphorus–Nitrogen–Silicon Synergistic Adhesives. Indus-

© N. Lysak, O. Skorodumova, A. Chernukha

trial & Engineering Chemistry Research. 2017. Vol. 56. № 16. P. 4649–4658. doi: 10.1021/acs.iecr.6b05065

2. Zhao W., Zhao H., Cheng J., Li W., Zhang J., Wang Y. A green, durable and effective flame-retardant coating for expandable polystyrene foams. Chemical Engineering Journal. 2022. Vol. 440. P. 135807. doi: 10.1016/j.cej.2022.135807

3. Li M., Yan Y., Zhao H., Jian R., Wang Y. A facile and efficient flame-retardant and smoke-suppressant resin coating for expanded polystyrene foams. Composites Part B: Engineering. 2020. Vol. 185. P. 107797. doi: 10.1016/j.compositesb.

4. Azevedo A. R. G., França B. R., Alexandre J., Marvila M. T., Zanelato E. B., Xavier G. C. Influence of sintering temperature of a ceramic substrate in mortar adhesion for civil construction. Journal of Building Engineering. 2018. Vol. 19. P. 342–348. doi: 10.1016/j.jobe.2018.05.026

5. Greluk M., Hubicki Z. Evaluation of polystyrene anion exchange resin for removal of reactive dyes from aqueous solutions. Chemical Engineering Research and Design. 2013. Vol. 91. № 7. P. 1343–1351. doi: 10.1016/j.cherd.2013.01.019

6. Zhang Q., Zhang Z., Teng J., Huang H., Peng Q., Jiao T., Hou L., Li B. Highly efficient phosphate sequestration in aqueous solutions using nanomagnesium hydroxide modified polystyrene materials. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2015. Vol. 54. № 11. P. 2940–2949. doi: org/10.1021/ie503943z

7. Du C., Jia J., Liao X., Zhou L., Hu Z., Pan B. Phosphate removal by polystyrene anion exchanger (PsAX)-supporting Fe-loaded nanocomposites: Effects of PsAX functional groups and ferric (hydr)oxide crystallinity. Chemical Engineering Journal. 2020. Vol. 387. P. 124193. doi: 10.1016/j.cej.2020.124193

8. Wang S., Zhang M., Wang D., Zhang W., Liu S. Synthesis of hollow mesoporous silica microspheres through surface sol–gel process on polystyrene-co-poly(4-vinylpyridine) core–shell microspheres. Microporous and Mesoporous Materials. 2011. Vol. 139. № 1–3. P. 1–7. doi: 10.1016/j.micromeso.2010.10.002

9. Zou H., Wu S., Ran Q., Shen J. A simple and Low-Cost method for the preparation of monodisperse hollow silica spheres. Journal of Physical Chemistry C. 2008. Vol. 112. № 31. P. 11623–11629. doi: 10.1021/jp800557k

10. Mielczarski J., Jeyachandran Y., Mielczarski E., Rai B. Modification of polystyrene surface in aqueous solutions. Journal of Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 362. № 2. P. 532–539. doi: 10.1016/j.jcis.2011.05.068

11. Skorodumova O., Tarakhno O., Chebotaryova O., Hapon Y., Emen F. M. Formation of Fire Retardant Properties in Elastic Silica Coatings for Textile Materials. Materials Science Forum. 2020. Vol. 1006. P. 25–31. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.1006.25

12. Cox R. A. Styrene hydration and stilbene isomerization in strong acid media. An excess acidity analysis. Canadian Journal of Chemistry. 1999. Vol. 77. № 5–6. P. 709–718. doi: 10.1139/v99-028

13. Bryukhanov A. L., Vlasov D. Y., Maiorova M. A., Tsarovtseva I. M. The role of microorganisms in the destruction of concrete and reinforced concrete structures. Power Technology and Engineering. 2021. Vol. 54. № 5. P. 609–614. doi: 10.1007/s10749-020-01260-5

14. Davarnejad R. Alkenes – Recent advances, new perspectives and applications. IntechOpen, 2021. doi: 10.5772/intechopen.94671

Надійшла до редколегії: 28.09.2023
Прийнята до друку: 08.11.2023

УДК 519.6

***О. О. Попов*[1]**, *д.т.н., професор, в. о. директора (ORCID 0000-0002-5065-3822)*
***О. М. Данілін*[2]**, *к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0002-4474-7179)*
***О. А. Петухова*[2]**, *к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-4832-1255)*
***П. Ю. Бородич*[2]**, *к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-9933-8498)*
[1]*Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, Київ, Україна*
[2]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

МОДЕЛЬ ВИПАДКОВИХ ПУЛЬСАЦІЙ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ВІД ПОЖЕЖІ ГОРЮЧОЇ РІДИНИ

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в резервуарі або в розливі. На відміну від стандартного підходу, коли форма полум'я приймається сталою, розглянуто випадкові пульсації полум'я, обумовлені турбулентним режимом горіння рідини. Наслідком таких пульсацій є випадковий характер як коефіцієнта взаємного опромінення, так і температури випромінюючої поверхні полум'я. Це, в свою чергу, призводить до випадкового значення щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі. Із використанням центральної граничної теореми обґрунтовано припущення про нормальний закон розподілу щільності теплового потоку випромінюванням, коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я. Припущення про нормальний закон розподілу дозволяє обчислити математичне очікування щільності теплового потоку. Показано, що середнє значення щільності теплового потоку зростає із збільшенням дисперсій температури випромінюючої поверхні та коефіцієнта взаємного опромінення, а також із збільшенням коефіцієнта кореляції між ними. Це означає, що неврахування випадкових пульсацій полум'я може призводити до занижених оцінок середньої величини щільності теплового потоку від пожежі. Знайдено дисперсію щільності теплового потоку випромінюванням і показано, що вона збільшується із зростанням дисперсій температури полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення. Дисперсія температури має більший вклад в приріст середнього значення теплового потоку випромінюванням порівняно с дисперсією коефіцієнта взаємного опромінення. Середньоквадратичне відхилення щільності теплового потоку може складати понад 40 % від його середнього значення при середньоквадратичних відхиленнях температури полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення до 10 % від їх середніх значень. Отримані результати можуть бути використані для уточнення теплового впливу пожежі горючої рідини на сусідні об'єкти.

Ключові слова: пожежа горючої рідини, пожежа в резервуарному парку, тепловий вплив пожежі, теплообмін

1. Вступ

Резервуарні комплекси для зберігання сирої нафти відіграють важливу роль у світовій економіці. Накопичення горючих рідин на обмеженій площі призводить до підвищеної пожежної небезпеки. У разі виникнення пожежі її ліквідація ускладнюється внаслідок загрози розповсюдження полум'я на сусідні резервуари. Такий сценарій розвитку пожежі стає можливим внаслідок теплового потоку від пожежі до сусідніх резервуарів, що може призвести до втрати міцності їх окремими елементами або до їх горіння чи вибуху. Передача тепла в таких випадках відбувається шляхом випромінювання або внаслідок безпосереднього контакту з полум'ям [1]. Останнім часом у світі сталися декілька великих пожеж у нафтових резервуарах, під час яких згоріли два чи більше суміжних резервуари [2]. Це призводить до значних економічних втрат і серйозного забруднення навколишнього середовища [3]. Згідно дослідження [4] 44 % аварій, в яких мало місце каскадне розповсюдження пожежі, починалися з пожежі рідини. При цьому може мати місце як розлив рідини і подальше її займання [5], так і горіння рідини безпосередньо в резервуарах. У випадку горіння в резервуарі саме теплове випромінювання є причиною нагріву сусідніх технологічних споруд до небезпечних значень температури.

Таким чином, проблема каскадного розвитку пожежі в резервуарних парках є актуальною.

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В [6] проаналізовано низку масштабних аварій в резервуарних парках, пов'язаних з пожежами або вибухами. Основну увагу приділено тому, якими були відстані між резервуаром, що горів (або вибухнув), і сусідніми резервуарами, а також тому, чи є такі відстані безпечними. Крім того, перевірено, чи було збільшено відстані на підприємствах, де сталися такі аварії. Але економічна вигода від концентрації виробництва переважає ризики і майже завжди резервуари та інше технологічне обладнання розміщується на відстані, яка не є безпечною. В [7] за допомогою байєсовських мереж дослід-жено можливі сценарії розповсюдження пожежі внаслідок «ефекту доміно». Запропонована методологія враховує ефекти вибухової хвилі та теплового випромінювання пожежі. Але величина теплового випромінювання в роботі припускається заданою апріорі. В [8] для дослідження каскадного розповсюдження пожежі також використано апарат байєсовських мереж. Але і тут не приділено достатньої уваги розрахунку теплового потоку випромінюванням від резервуара, що горить.

В [9] з використанням пакету обчислювальної гідродинаміки (CFD) проведено моделювання теплового впливу пожежі в басейні з горючою рідиною на сусідній резервуар. Проведено порівняння результатів моделювання з експериментальними дослідженнями щодо горіння басейну з сирою нафтою діаметром 1 м та басейнами з гасом діаметром 30 м і 50 м. Недоліком роботи є неможливість узагальнити отримані дані на випадки горіння в інших умовах. В [10] досліджено тепловий вплив від пожежі в двох резервуарах на сусідній резервуар. Моделювання горіння в резервуарах проводилося за допомогою системи моделювання динаміки пожеж (FDS), а для розрахунку розподілу температур і напружень в сусідньому резервуарі використовувався метод скінчених елементів. Недоліком такого підходу є складність перенесення отриманих результатів на іншу конфігурацію резервуарів.

В [11] наведено огляд основних підходів до моделювання пожеж у басейнах і резервуарах, які враховують ефекти масштабу, вітру, вплив тиску та сили тяжіння, а також динаміку пожежі в кількох басейнах. Проаналізовано фактори, які впливають на питому масову швидкість вигорання, довжину і нахил полум'я. Підкреслено, що тепловий потік випромінюванням є основним видом теплопередачі при пожежах такого типу. При цьому пульсації полум'я, викликані турбулентним режимом горіння залишаються не розглянутими. В [12] експериментально досліджено структуру полум'я та його висоту в залежності від довжини сторони квадратного осередку горіння: (0,15÷0,30) м. Але практичне використання отриманих результатів ускладнено внаслідок істотної різниці між розмірами лабораторної установки і реальних резервуарів.

В [13] проведено експериментальні дослідження довжини полум'я та частоти його пульсацій як в процесі розтікання рідини, так і при досягненні розливом максимальної площі. Побудовано емпіричні залежності довжини полум'я і частоти пульсацій від площі розливу. При цьому розглядається лише детермінована складова пульсацій, а її випадкову складову залишено поза увагою. В огляді [14] проаналізовано питому масову швидкість вигорання рідини при пожежі в басейні, висоту полум'я, пульсації полум'я, теплопередачу випромінюванням та ризик розповсюдження пожежі. Але істотним обмеженням при цьому є умова відсутності вітру. В [15] наведено результати експериментальних досліджень щодо частоти пульсацій полум'я при горінні в прямокутних басейнах. Побудовано емпіричну залежність частоти пульсацій від розмірів басейну, окремо досліджено поведінку полум'я

вздовж стінок і в кутах басейну. Але при цьому розглянуто лише детерміновано складову пульсацій, в випадкова складова залишена поза увагою. В [16] з використанням апарату часових рядів моделюються випадкові пульсації полум'я. Але це моделювання базується на експериментальному дослідженні горіння в ємності діаметром 7,1 см, що істотно ускладнює використання отриманих результатів для випадку реальних пожеж. В [17] побудовано модель нагріву стінки резервуара під тепловим впливом пожежі. Припускається, що коефіцієнт взаємного опромінення має нормальний закон розподілу. При цьому питання визначення параметрів розподілу залишено поза увагою.

Аналіз моделей горіння нафтопродукту в резервуарі або розливі засвідчив, що випадкова складова теплового випромінювання від пожежі залишається недостатньо вивченою. Це, в свою чергу, може призводити до похибки в оцінці теплового впливу на сусідні резервуари та визначення необхідного захисту.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є врахування випадкової складової теплового потоку випромінюванням від пожежі горючої рідини.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є побудова моделі випадкових пульсацій теплового потоку випромінюванням від пожежі горючої рідини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– представити щільність теплового потоку випромінюванням у вигляді випадкового процесу;

– визначити математичне очікування щільності теплового потоку випромінюванням;

– визначити дисперсію щільності теплового потоку випромінюванням.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес горіння рідини в резервуарі або в розливі. Основна гіпотеза дослідження полягає в тому, що коефіцієнти взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я мають нормальний закон розподілу. Для визначення параметрів розподілу щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі горючої рідини використовувалися методи теорії ймовірностей. Для проведення інтегрування було застосовано математичний пакет Maple 18 (Канада). Розрахунки проведено на прикладі резервуара типу РВС (резервуар вертикальний сталевий) зі стаціонарною покрівлею.

5. Побудова моделі випадкових пульсацій теплового потоку випромінюванням від пожежі рідини

5.1. Представлення щільності теплового потоку випромінюванням як випадкового процесу

Тепловий потік випромінюванням від пожежі визначається законом Стефана-Больцмана:

$$q = c_0 \varepsilon_f \left[\left(\frac{T_f}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \psi, \qquad (1)$$

де c_0=5,67 Вт/(м^2·К^4) – стала; ε_f – ступінь чорноти випромінюючої поверхні факе-

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

ла; T_f – температура поверхні факела; T – температура площадки, яка опромінюється; ψ – коефіцієнт взаємного опромінення між факелом і площадкою:

$$\psi = \frac{1}{\pi}\iint_S \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{r^2} dS; \qquad (2)$$

r – радіус-вектор, що з'єднує точку А на поверхні полум'я і елементарну площадку, яка опромінюється; φ_1 – кут між радіус-вектором r і нормальним вектором $\vec{n}_1$ до поверхні полум'я в точці А; φ_2 – кут між радіус-вектором r і нормальним вектором $\vec{n}_2$ до елементарної площадки (рис. 1). Інтеграл в (2) обчислюється по множині точок S, в яких кути φ_1 і φ_2 є гострими (тобто косинуси в (2) є додатними).

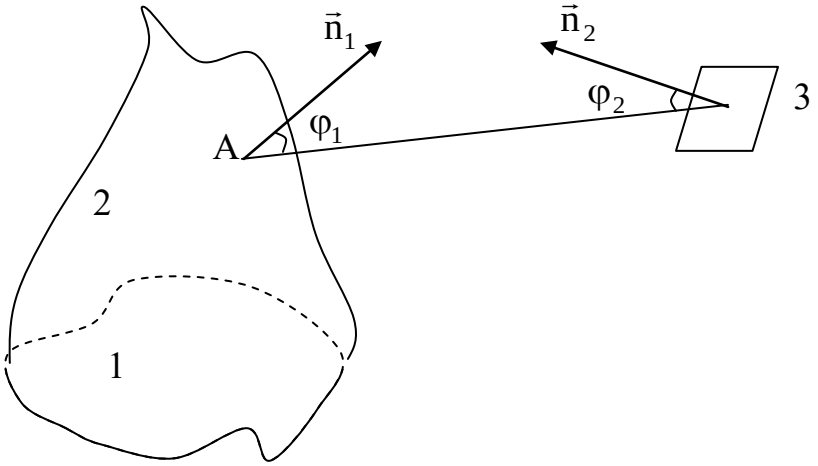


Рис. 1. До обчислення коефіцієнта взаємного опромінення: 1 – рідина, що горить; 2 – полум'я; 3 – елементарна площадка, що опромінюється

В загальному випадку, коли температура випромінюючої поверхні факела є різною в різних точках, залежність для щільності теплового потоку випромінюванням набуває вигляду:

$$q = \frac{c_0 \varepsilon_f}{\pi}\iint_S \frac{\cos\varphi_1 \cos\varphi_2}{r^2}\left[\left(\frac{T_f}{100}\right)^4 - \left(\frac{T}{100}\right)^4\right] dS. \qquad (3)$$

При розрахунку теплового потоку випромінюванням від полум'я над круговим розливом рідин факел представляють у вигляді фігури простої форми, наприклад, конуса. В той же час, візуальне спостереження за горінням рідин свідчить про постійну зміну форми полум'я, викликану турбулентним характером горіння (рис. 2).

Враховуючи турбулентний характер горіння, будемо вважати, що температура поверхні полум'я описується випадковим процесом θ(t), а коефіцієнт взаємного опромінення – випадковим процесом η(t). Із формули (3) випливає, що загальний тепловий потік являє собою суму теплового випромінювання від окремих елементарних площадок на поверхні полум'я. При цьому температура кожної такої площадки в певний момент часу є випадковою величиною. Виходячи з центральної граничної теореми, в якій стверджується, що сума великої кількості випадкових величин має тенденцію до нормального розподілу при достатньо ве-

ликому обсязі вибірки, будемо вважати, що щільність теплового потоку має нормальний розподіл. Тоді щільність теплового потоку випромінюванням може бути представлена випадковим процесом ξ(t):

$$\xi(t) = c_0 \varepsilon_f \left[\left(\frac{\theta(t)}{100} \right)^4 - \left(\frac{T}{100} \right)^4 \right] \eta(t), \tag{4}$$

Виконуючи перетворення в (4), отримаємо:

$$\xi = \frac{c_0 \varepsilon_f}{10^8} \left[\theta^4 - T^4 \right] \eta;$$
$$\xi = c\left(\theta^4 - a \right) \eta, \tag{5}$$

де

$$c = \frac{c_0 \varepsilon_f}{10^8}; \; a = T^4.$$

Рис. 2. Пожежа в резервуарі з сирою нафтою, Кувейт, 2010 рік

Відзначимо, що величини c і a у виразі (5) є детермінованими. Сумісний закон розподілу випадкових величин θ, η має вигляд:

$$p_{\theta\eta}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_\theta \sigma_\eta \sqrt{1 - r^2}} \times$$
$$\times \exp\left\{ -\frac{1}{\left(1 - r^2\right)} \left[\frac{\left(x - \overline{\theta}\right)^2}{2\sigma_\theta^2} - r \frac{\left(x - \overline{\theta}\right)\left(y - \overline{\eta}\right)}{\sigma_\theta \sigma_\eta} + \frac{\left(y - \overline{\eta}\right)^2}{2\sigma_\eta^2} \right] \right\}, \tag{6}$$

де $\overline{\theta}$, $\overline{\eta}$ – математичні очікування випадкових величин θ, η, що описують температуру випромінюючої поверхні полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення відповідно; σ_θ, σ_η – їх середньоквадратичні відхилення; r – коефіцієнт взаємної кореляції між випадковими процесами θ, η.

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

Також, розглядаючи щільність теплового потоку у вигляді (1), будемо вважати що температура випромінюючої поверхні і коефіцієнт взаємного опромінення також розподілені нормально.

5.2. Визначення математичного очікування щільності теплового потоку випромінюванням

Математичне очікування щільності теплового потоку $\overline{\xi}$ визначається формулою:

$$\overline{\xi} = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} c\left(x^4 - a\right) y \cdot p_{\theta\eta}(x, y)\,dx\,dy\,. \tag{7}$$

Обчислюючи інтеграл за допомогою, математичного пакету Maple, отримаємо:

$$\overline{\xi} = c\left(\overline{\theta}^4\overline{\eta} + 4\overline{\theta}^3 r\sigma_\theta\sigma_\eta + 6\overline{\theta}^2\overline{\eta}\sigma_\theta^2 + 12\overline{\theta} r\sigma_\theta^3\sigma_\eta + 3\overline{\eta}\sigma_\theta^4 - a\overline{\eta}\right). \tag{8}$$

Нехай середньоквадратичні відхилення σ_θ, σ_η пов'язані з відповідними математичними сподіваннями співвідношеннями:

$$\sigma_\theta = k_\theta\overline{\theta}\,;\ \sigma_\eta = k_\eta\overline{\eta}\,. \tag{9}$$

Тоді підстановка (9) в (8) дає:

$$\begin{aligned}\overline{\xi} &= c\left(\overline{\theta}^4\overline{\eta} + 4\overline{\theta}^4\overline{\eta} r k_\theta k_\eta + 6\overline{\theta}^4\overline{\eta} k_\theta^2 + 12\overline{\theta}^4\overline{\eta} r k_\theta^3 k_\eta + 3\overline{\theta}^4\overline{\eta} k_\theta^4 - a\overline{\eta}\right) = \\ &= c\left[\overline{\theta}^4\left(1 + 4r k_\theta k_\eta + 6k_\theta^2 + 12r k_\theta^3 k_\eta + 3k_\theta^4\right) - a\right]\overline{\eta} = \\ &= c\left[\overline{\theta}^4\left(1 + 4r k_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right)\right) - a\right]\overline{\eta}\,.\end{aligned} \tag{10}$$

Розглянемо відносну різницю між середнім значенням щільності теплового потоку випромінюванням при стохастичному і детермінованому підході:

$$\delta_1 = \frac{\overline{\xi} - q}{q}\,.$$

Підставляючи (10) в останній вираз, отримаємо:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= \frac{c\left[\overline{\theta}^4\left(1 + 4r k_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right)\right) - a\right]\overline{\eta} - c\left[\overline{\theta}^4 - a\right]\overline{\eta}}{c\left[\overline{\theta}^4 - a\right]\overline{\eta}} = \\ &= \frac{\overline{\theta}^4\left(1 + 4r k_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right)\right) - \overline{\theta}^4}{\overline{\theta}^4 - a} = \\ &= \frac{\overline{\theta}^4\left(4r k_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right)\right)}{\overline{\theta}^4 - a}\,.\end{aligned}$$

Враховуючи, що середня температура полум'я $\overline{\theta} \cong 1300$ К, а температура навколишнього середовища $T \cong 300$ К, то:

$$\frac{\overline{\theta}^4}{\overline{\theta}^4 - a} \cong \frac{1300^4}{1300^4 - 300^4} \approx 1{,}0028 \approx 1.$$

Тоді

$$\delta_1 \cong 4rk_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right). \tag{11}$$

На рис. 3 показано залежність відносного приросту щільності теплового потоку випромінюванням δ_1 від величин k_θ, k_η при r=0,5.

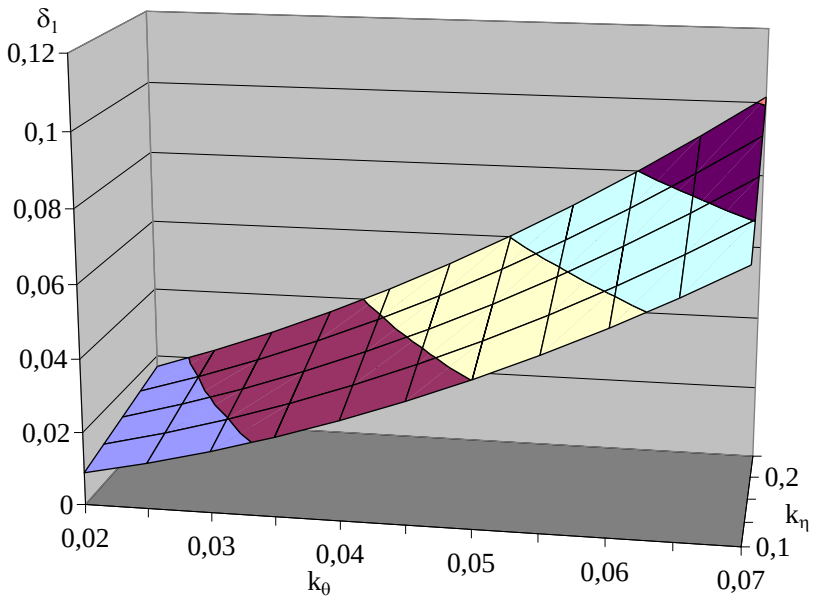


Рис. 3. Відносний приріст середнього значення щільності теплового потоку випромінюванням від полум'я в залежності від величин k_θ, k_η при r=0,5

Аналіз рис. 3 свідчить, що наявність випадкових пульсацій полум'я збільшує середнє значення теплового потоку до 10 % порівняно з випадком, коли пульсації відсутні.

5.3. Визначення дисперсії щільності теплового потоку випромінюванням

Для обчислення дисперсії щільності теплового потоку скористаємося властивістю:

$$\sigma_\xi^2 = M\left(\xi - \overline{\xi}\right)^2 = M\left(\xi^2 - 2\xi\overline{\xi} + \overline{\xi}^2\right) = M\xi^2 - 2\overline{\xi}^2 + \overline{\xi}^2 = M\xi^2 - \overline{\xi}^2.$$

Тоді

$$\sigma_\xi^2 = \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\left[c\left(x^4 - a\right)y\right]^2 \cdot p_{\theta\eta}(x, y)\,dx\,dy - \overline{\xi}^2. \tag{12}$$

Обчислюючи цей інтеграл за допомогою математичного пакету Maple, отримаємо:

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

$$\frac{\sigma_\xi^2}{c^2} = 40\bar{\theta}^6 r^2\sigma_\theta^2\sigma_\eta^2 + 744\bar{\theta}^4 r^2\sigma_\theta^4\sigma_\eta^2 + 2376\bar{\theta}^2 r^2\sigma_\theta^6\sigma_\eta^2 + 840r^2\sigma_\theta^8\sigma_\eta^2 +$$
$$+ 8\bar{\theta}^7\bar{\eta} r\sigma_\theta\sigma_\eta + 264\bar{\theta}^5\bar{\eta} r\sigma_\theta^3\sigma_\eta + 1512\bar{\theta}^3\bar{\eta} r\sigma_\theta^5\sigma_\eta + 1608\bar{\theta}\bar{\eta} r\sigma_\theta^7\sigma_\eta + \bar{\theta}^8\sigma_\eta^2 +$$
$$+ 16\bar{\theta}^6\bar{\eta}^2\sigma_\theta^2 + 28\bar{\theta}^6\sigma_\theta^2\sigma_\eta^2 + 168\bar{\theta}^4\bar{\eta}^2\sigma_\theta^4 + 210\bar{\theta}^4\sigma_\theta^4\sigma_\eta^2 + 384\bar{\theta}^2\bar{\eta}^2\sigma_\theta^6 +$$
$$+ 420\bar{\theta}^2\sigma_\theta^6\sigma_\eta^2 + 96\bar{\eta}^2\sigma_\theta^8 + 105\sigma_\theta^8\sigma_\eta^2 - 24a\bar{\theta}^2 r^2\sigma_\theta^2\sigma_\eta^2 - 24ar^2\sigma_\theta^4\sigma_\eta^2 - 8a\bar{\theta}^3\bar{\eta} r\sigma_\theta\sigma_\eta -$$
$$- 24a\bar{\theta}\bar{\eta} r\sigma_\theta^3\sigma_\eta - 2a\bar{\theta}^4\sigma_\eta^2 - 12a\bar{\theta}^2\sigma_\theta^2\sigma_\eta^2 - a\sigma_\theta^4\sigma_\eta^2 + a^2\sigma_\eta^2. \quad (13)$$

Підстановка (9) в (13) перетворює вираз для дисперсії щільності теплового потоку на

$$\sigma_\xi^2 = c^2\bar{\eta}^2\left[\bar{\theta}^8 k_\eta^2\left(40r^2k_\theta^2 + 744r^2k_\theta^4 + 2376r^2k_\theta^6 + 840r^2k_\theta^8 + \right.\right.$$
$$\left. + 1 + 28k_\theta^2 + 210k_\theta^4 + 420k_\theta^6 + 105k_\theta^8\right) +$$
$$+ 8\bar{\theta}^8 rk_\eta k_\theta\left(1 + 33k_\theta^2 + 139k_\theta^4 + 201k_\theta^6\right) + \bar{\theta}^8\left(16k_\theta^2 + 168k_\theta^4 + 284k_\theta^6 + 96k_\theta^8\right) -$$
$$\left. - a\bar{\theta}^4 k_\eta^2\left(24r^2k_\theta^2 + 24r^2k_\theta^4 + 2 + 12k_\theta^2 + 6k_\theta^4\right) - 8a\bar{\theta}^4 rk_\eta k_\theta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + a^2k_\eta^2\right]. \quad (14)$$

Відносна величина пульсацій щільності теплового потоку випромінюванням характеризується відношенням середньоквадратичного відхилення щільності теплового потоку до його математичного очікування:

$$\delta_2 = \frac{\sigma_\xi}{\bar{\xi}}. \quad (15)$$

Об'єднуючи (10), (14), (15), отримаємо:

$$\delta_2 = \left[\bar{\theta}^4\left(1 + 4rk_\theta k_\eta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + 3k_\theta^2\left(2 + k_\theta^2\right)\right) - a\right]^{-1} \times$$
$$\times\left[\bar{\theta}^8 k_\eta^2\left(40r^2k_\theta^2 + 744r^2k_\theta^4 + 2376r^2k_\theta^6 + 840r^2k_\theta^8 + \right.\right.$$
$$\left. + 1 + 28k_\theta^2 + 210k_\theta^4 + 420k_\theta^6 + 105k_\theta^8\right) +$$
$$+ 8\bar{\theta}^8 rk_\eta k_\theta\left(1 + 33k_\theta^2 + 139k_\theta^4 + 201k_\theta^6\right) + \bar{\theta}^8\left(16k_\theta^2 + 168k_\theta^4 + 284k_\theta^6 + 96k_\theta^8\right) -$$
$$\left. - a\bar{\theta}^4 k_\eta^2\left(24r^2k_\theta^2 + 24r^2k_\theta^4 + 2 + 12k_\theta^2 + 6k_\theta^4\right) - 8a\bar{\theta}^4 rk_\eta k_\theta\left(1 + 3k_\theta^2\right) + a^2k_\eta^2\right]^{0,5}. \quad (16)$$

Залежність $\delta_2=\delta_2(k_\theta, k_\eta)$ проілюстровано на рис. 4 для r=0,5. При цьому було прийняті значення $\bar{\theta} = 1300$ К, Т=300 К.

Аналіз рис. 4 свідчить, що дисперсія теплового потоку збільшується із зростанням дисперсій коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні.

6. Обговорення результатів побудови моделі випадкових пульсацій теплового потоку випромінюванням

Теплове випромінювання є основним способом передачі тепла при пожежі горючих і легкозаймистих рідин. Для розрахунку щільності теплового потоку випромінюванням на сусідні об'єкти використовують закон Стефана-Больцмана (1), який містить такі параметри, як температура випромінюючої поверхні

полум'я і коефіцієнт взаємного опромінення. Як правило, при розрахунках приймають сталу температуру випромінюючої поверхні і факел у формі простої тривимірної фігури (конуса, циліндра, напівсфери тощо). В той же час, візуальні спостереження за горінням рідин у резервуарах або розливах показують, що факел не має постійної форми (рис. 2). Внаслідок турбулентного режиму горіння полум'ю притаманні випадкові пульсації. Такі пульсації призводять до випадкових змін коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я. Це, в свою чергу, веде до випадкового характеру теплового потоку випромінюванням від пожежі. Враховуючи, що загальний тепловий потік випромінюванням є сумою теплових потоків від окремих областей, і спираючись на центральну граничну теорему, є підстави вважати що щільність теплового потоку має нормальний розподіл.

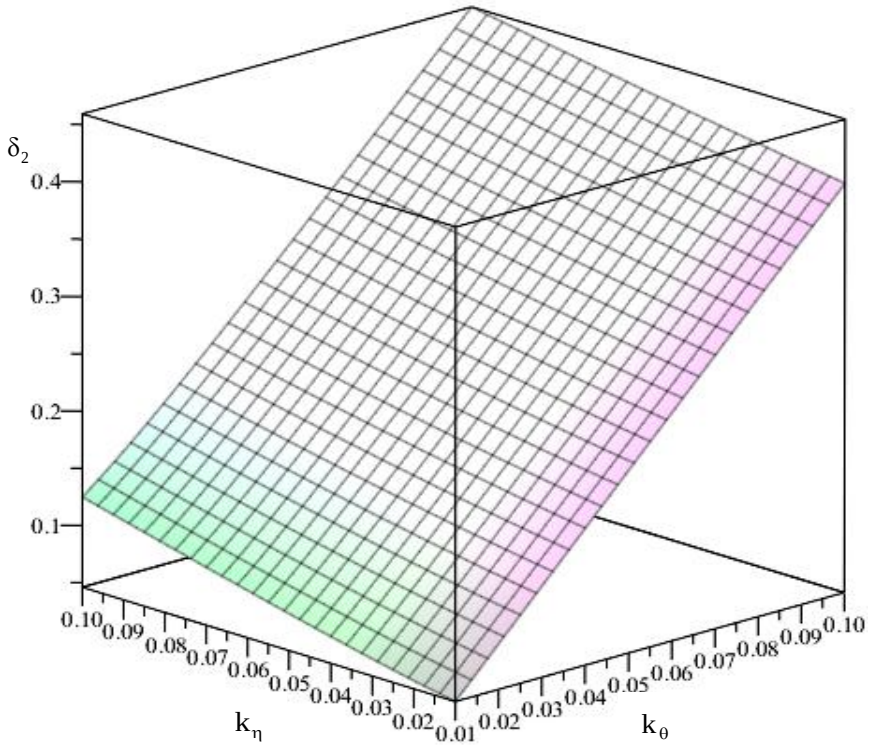


Рис. 4. Відносна величина пульсацій щільності теплового потоку від полум'я в залежності від величин k_θ, k_η при r=0,5

Сумісний розподіл випадкових процесів θ(t), η(t), які відповідають температурі випромінюючої поверхні полум'я і коефіцієнту взаємного опромінення, описується формулою (6). В якості математичного очікування $\overline{\theta}$ може бути взяте довідникове значення температури полум'я для даного виду рідини. Математичне очікування $\overline{\eta}$ може бути обчислене як інтеграл (2), де в якості форми випромінюючої поверхні полум'я може бути прийнятий конус.

Припущення про нормальний розподіл випадкових процесів θ(t), η(t) дозволяє обчислити математичне очікування щільності теплового потоку за формулою (7). Обчислюючи інтеграл в (7) за допомогою математичного пакета Maple, отримаємо залежність поліноміального виду (8). Із аналізу цього виразу випливає, що середнє значення щільності теплового потоку зростає із збільшенням дисперсій температури випромінюючої поверхні та коефіцієнта взаємного опромінення, а також із збільшенням коефіцієнта кореляції між ними. Це означає, що неврахування випадкових пульсацій полум'я може призводити до занижених оцінок се-

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

редньої величини щільності теплового потоку від пожежі. Наприклад, для типових значень температури полум'я (T_f=1300 К) середнє значення щільності теплового потоку може бути до 10 % вище порівняно з випадком, коли випадкові пульсації полум'я не враховуються (рис. 3). Аналіз виразу (11) свідчить, що цей приріст лінійно залежить від дисперсії коефіцієнта взаємного опромінення і від четвертої степені температури полум'я. Внаслідок цього дисперсія температури має більший вклад в приріст середнього значення теплового потоку випромінюванням порівняно с дисперсією коефіцієнта взаємного опромінення (рис. 3).

Дисперсія щільності теплового потоку обчислюється за допомогою формули (12). Інтегрування в ній за допомогою пакета Maple дає залежність (13). Відносна величина пульсацій щільності теплового потоку (15) показує, наскільки значним є середньоквадратичне відхилення порівняно з середнім значенням. Аналіз виразу (16) та його зображення на рис. 4 показує, що відносна величина пульсацій збільшується із зростанням дисперсій температури полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення. Причому залежність від коефіцієнта взаємного опромінення має майже лінійний характер. Для типового значення температури полум'я (T_f=1300 К) величина середньоквадратичного відхилення щільності теплового потоку може складати понад 40 % від її середнього значення при середньоквадратичних відхиленнях температури полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення до 10 % від їх середніх значень (рис. 4).

Перевагою побудованої моделі є врахування випадкового характеру теплового випромінювання від пожежі рідини, що дозволяє більш точно врахувати наслідки його впливу на сусідні об'єкти.

Обмеженням побудованої моделі є те, що вона виходить із нормального закону розподілу коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальною перевіркою гіпотез про розподіл випадкових величин, що описують коефіцієнт взаємного опромінення і температуру випромінюючої поверхні.

7. Висновки

1. Запропоновано представлення теплового потоку випромінюванням від пожежі рідини у вигляді випадкового процесу. Випадковість процесу пов'язана із турбулентним режимом горіння рідини, внаслідок чого випадковий характер має випромінююча поверхня полум'я і коефіцієнт взаємного опромінення. Із використанням центральної граничної теореми обґрунтовано припущення про нормальний закон розподілу щільності теплового потоку випромінюванням, коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я.

2. Виходячи із припущення про нормальний закон розподілу коефіцієнта взаємного опромінення і температури випромінюючої поверхні полум'я, побудовано оцінку математичного очікування щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі. Показано що математичне очікування зростає із збільшенням дисперсій температури випромінюючої поверхні та коефіцієнта взаємного опромінення, а також із збільшенням коефіцієнта кореляції між ними. Для типових значень температури полум'я для горючих рідин середнє значення щільності теплового потоку може бути до 10 % вище порівняно з випадком, коли випадкові пульсації полум'я не враховуються.

3. Показано, що дисперсія щільності теплового потоку випромінюванням від пожежі збільшується із зростанням дисперсій температури полум'я і коефіцієнта

взаємного опромінення. При цьому вклад дисперсії температури є більшим порівняно з вкладом дисперсії коефіцієнта взаємного опромінення. Для типового значення температури полум'я горючої рідини величина середньоквадратичного відхилення щільності теплового потоку може складати понад 40 % від його середнього значення при середньоквадратичних відхиленнях температури полум'я і коефіцієнта взаємного опромінення до 10 % від їх середніх значень.

Література

1. Landucci G., Gubinelli G., Antonioni G., Cozzani V. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. Accident Analysis & Prevention. 2009. Vol. 41(6). P. 1206–1215. doi: 10.1016/j.aap.2008.05.006

2. Elhelw M., El-Shobaky A., Attia A., El-Maghlany W. M. Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection. 2021. Vol. 146. P. 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

3. 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

4. Reniers G., Cozzani V. 3 – Features of Escalation Scenarios. Elsevier. Domino Effects in the Process Industries. 2013. P. 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

5. Liu J., Li D., Wang Z., Chai X. A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 28. P. 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

6. Tauseef S., Abbasi T., Pompapathi V., Abbasi S. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 120. P. 331–338. doi: 10.1016/j.psep.2018.09.017

7. Li X., Chen G., Amyotte P., Alauddin M., Khan F. Modeling and analysis of domino effect in petrochemical storage tank farms under the synergistic effect of explosion and fire. Process Safety and Environmental Protection. 2023. Vol. 176. P. 706–715. doi: 10.1016/j.psep.2023.06.054

8. Khakzad N., Amyotte P., Cozzani V., Reniers G., Pasman H. How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2018. Vol. 54. P. 49–56. doi: 10.1016/j.jlp.2018.03.001

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. 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

11. Chen Y., Fang J., Zhang X., Miao Y., Lin Y., Tu R., Hu L. Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. Progress in Energy and Combustion Science. 2023. Vol. 95. P. 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070

12. Sun X., Zhang X., Lv J., Chen X., Hu L. Experimental study on the buoyant turbulent diffusion flame height of various intermittent levels. Applied Energy. 2023. Vol. 351. P. 121699. doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121699

13. Zhao J., Song G., Zhang Q., Li X., Huang H., Zhang J. Experimental study on flame length and pulsation behavior of n-heptane continuous spill fires on water.

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2023. Vol. 85. P. 105174. doi: 10.1016/j.jlp.2023.105174

14. Guo Y., Xiao G., Wang L., Chen C., Deng H., Mi H., Tu C., Li Y. Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art. Fire Safety Journal. 2023. Vol. 136. P. 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755

15. Huang X., Huang T., Zhuo X., Tang F., He L., Wen J. A global model for flame pulsation frequency of buoyancy-controlled rectangular gas fuel fire with different boundaries. Fuel. 2021. Vol. 289. P. 119857. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119857

16. Biswas K., Zheng Y., Kim C. H., Gore J. Stochastic time series analysis of pulsating buoyant pool fires. Proceedings of the Combustion Institute. 2007. Vol. 31(2). P. 2581–2588. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.234

17. Абрамов Ю. О, Басманов О. Є., Олійник В. В., Колоколов В. О. Стохастична модель нагріву стінки резервуара під впливом пожежі. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. 1(35). С. 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-1

O. Popov*[1]*, *Dsc, Professor, Acting Director*
A. Danilin*[2]*, *PhD, Associate Professor, Head of Department*
O. Petukhova*[2]*, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of Department*
P. Borodych*[2]*, *Associate Professor, Associate Professor of the Department*
[1]*Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine*
[2]*National University of Civil Defence of Ukraine*

A MODEL OF RANDOM PULSATIONS OF RADIANT HEAT FLOW FROM A FLAMMABLE LIQUID FIRE

The object of the study is the process of liquid combustion in a tank or in a spill. Unlike the standard approach that assumes the shape of the flame is constant, random pulsations of the flame due to the turbulent mode of liquid combustion are considered. The pulsations lead to the random nature of the mutual radiation coefficient and the temperature of the radiating surface of the flame. This leads to a random value of the radiant heat flux density from the fire. Using the central limit theorem allows justifying the assumption about the normal law of the distribution of the radiant heat flux density, the mutual radiation coefficient and the temperature of the radiating surface of the flame. The assumption of a normal distribution law allows calculating the mathematical expectation of the heat flux density. It is shown that the average value of the heat flux density increases with an increase in the dispersion of the temperature of the radiating surface and the coefficient of mutual radiation, as well as with an increase in the correlation coefficient between them. It means that neglecting random flame pulsations can lead to underestimates of the average heat flux density from a fire. The dispersion of the radiant heat flux density was found and it was shown that it increases with the growth of the dispersion of the flame temperature and the mutual radiation coefficient. The standard deviation of the heat flux density can be more than 40 % of its average value if the standard deviations of the flame temperature and the mutual radiation coefficient are up to 10 % of their average values. The obtained results can be used to clarify the thermal effect of a liquid fire on neighboring objects.

Keywords: spill fire, fire in the tank farm, thermal effect of fire, heat exchange

References

1. Landucci, G., Gubinelli, G., Antonioni, G., Cozzani, V. (2009). The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. Accident Analysis & Prevention, 41(6), 1206–1215. doi: 10.1016/j.aap.2008.05.006

2. Elhelw, M., El-Shobaky, A., Attia, A., El-Maghlany, W. M. (2021). Advanced dynamic modeling study of fire and smoke of crude oil storage tanks. Process Safety and Environmental Protection, 146, 670–685. doi: 10.1016/j.psep.2020.12.002

3. 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

4. Reniers, G., Cozzani, V. (2013). 3 – Features of Escalation Scenarios. Elsevier. Domino Effects in the Process Industries, 30–42. doi: 10.1016/B978-0-444-54323-3.00003-8

5. Liu, J., Li, D., Wang, Z., Chai, X. (2021). A state-of-the-art research progress and prospect of liquid fuel spill fires. Case Studies in Thermal Engineering, 28, 101421. doi: 10.1016/j.csite.2021.101421

6. Tauseef, S., Abbasi, T., Pompapathi, V., Abbasi, S. (2018). Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. Process Safety and Environmental Protection, 120, 331–338. doi: 10.1016/j.psep.2018.09.017

7. Li, X., Chen, G., Amyotte, P., Alauddin, M., Khan, F. (2023). Modeling and analysis of domino effect in petrochemical storage tank farms under the synergistic effect of explosion and fire. Process Safety and Environmental Protection, 176, 706–715. doi: 10.1016/j.psep.2023.06.054

8. Khakzad, N., Amyotte, P., Cozzani, V., Reniers, G., Pasman, H. (2018). How to address model uncertainty in the escalation of domino effects? Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 54, 49–56. doi: 10.1016/j.jlp.2018.03.001

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. 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

11. Chen, Y., Fang, J., Zhang, X., Miao, Y., Lin, Y., Tu, R., Hu, L. (2023). Pool fire dynamics: Principles, models and recent advances. Progress in Energy and Combustion Science, 95, 101070. doi: 10.1016/j.pecs.2022.101070

12. Sun, X., Zhang, X., Lv, J., Chen, X., Hu, L. (2023). Experimental study on the buoyant turbulent diffusion flame height of various intermittent levels. Applied Energy, 351, 121699. Doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121699

13. Zhao, J., Song, G., Zhang, Q., Li, X., Huang, H., Zhang, J. (2023). Experimental study on flame length and pulsation behavior of n-heptane continuous spill fires on water. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 85, 105174. doi: 10.1016/j.jlp.2023.105174

14. Guo, Y., Xiao, G., Wang, L., Chen, C., Deng, H., Mi, H., Tu, C., Li, Y. (2023). Pool fire burning characteristics and risks under wind-free conditions: State-of-the-art. Fire Safety Journal, 136, 103755. doi: 10.1016/j.firesaf.2023.103755

15. Huang, X., Huang, T., Zhuo, X., Tang, F., He, L., & Wen, J. (2021). A global model for flame pulsation frequency of buoyancy-controlled rectangular gas fuel fire with different boundaries. Fuel, 289, 119857. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119857

16. Biswas, K., Zheng, Y., Kim, C. H., Gore, J. (2007). Stochastic time series analysis of pulsating buoyant pool fires. Proceedings of the Combustion Institute, 31(2), 2581–2588. doi: 10.1016/j.proci.2006.07.234

17. Abramov, Y., Basmanov, O., Oliinik, V., Kolokolov, V. (2022). Stochastic model of heating the shell of a tank under thermal effect of a fire. Problems of Emergency Situations, 1(35), 4–16. doi: 10.52363/2524-0226-2022-35-1

Надійшла до редколегії: 22.09.2023
Прийнята до друку: 13.11.2023

© О. О. Попов, О. М. Данілін, О. А. Петухова, П. Ю. Бородич

УДК 614.84

О. Є. Басманов, *д.т.н., професор, голов. н.с. відділу (ORCID 0000-0002-6434-6575)*
Д. І. Савельєв, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4310-0437)*
Р. С. Мележик, *н.с. відділу (ORCID 0000-0001-6425-4147)*
Т. О. Луценко, *к.н.держ.управл., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-7373-4548)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

АЛГОРИТМ ОПТИМАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ ТЕХНІКИ МІЖ ПОЖЕЖНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ

Об'єктом дослідження є процес функціонування пожежних підрозділів, а предметом дослідження – розподіл техніки між підрозділами, що обслуговують певну область. Побудовано алгоритм оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами. На практиці це відкриває можливості для зменшення часу слідування пожежних підрозділів до місця виклику за рахунок зміни зон обслуговування підрозділами. Модель спирається на припущення про достатність сил та засобів в пожежних підрозділах для проведення рятувальних робіт і ліквідації пожеж в області їх обслуговування. Модель виходить із розбиття всієї області відповідальності на окремі підобласті або виділення окремих об'єктів, для яких відомий перелік можливих аварійних ситуацій, пов'язаних з пожежами, їх частота, сили і засоби, необхідні для їх ліквідації. Джерелом такої інформації можуть бути статистичні дані щодо пожеж на таких об'єктах або розрахункові дані щодо рівня пожежної небезпеки. Сформульовано задачу оптимального визначення області відповідальності рятувальних підрозділів. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування підрозділів від місця розташування до місця виклику. Цільова функція включає в себе як час слідування, так і кількість одиниць техніки, залученої до ліквідації пожежі. Це дозволяє врахувати складність аварійної ситуації, оскільки більш складні ситуації будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділів. Обмеження задачі визначаються наявними силами і засобами в пожежних підрозділах. Побудовано алгоритм оптимального розподілу техніки між існуючими пожежними підрозділами. Показано, що область припустимих рішень є опуклою. Побудована модель може бути використана для визначення зон обслуговування вже існуючих пожежних підрозділів, а також при виборі місць розташування додаткових пожежних підрозділів.

Ключові слова: локальна територія, рівень небезпеки, функціональна спроможність, район обслуговування, розміщення підрозділів

1. Вступ

Захист життя людей і їх майна є основною задачею пожежних підрозділів. Кількісний і якісний склад, а також територіальне розташування цих підрозділів визначається впливом двох протилежних факторів. З одного боку, для зменшення наслідків пожеж необхідно збільшення кількості пожежних підрозділів. З іншого боку, зменшення витрат на їх функціонування вимагає їх зменшення. Враховуючи, що сили і засоби, необхідні для ліквідації пожеж, зосереджені в пожежних підрозділах, виникає питання щодо місць їх розміщення. При цьому критично важливим є час слідування підрозділів до місця виклику [1]. Крім того, різна функціональна спроможність окремих пожежних підрозділів вимагає врахування типу аварії і кількості сил і засобів, які мають бути залучені для її ліквідації. Особливого значення це набуває в містах, де тенденція до висотної забудови призводить до необхідності створення нових пожежних частин або до збільшення спроможностей вже існуючих [2]. Швидке реагування на аварійні ситуації відіграє важливу роль у порятунку життів. Правильний розподіл центрів реагування на надзвичайні ситуації, таких як пожежні підрозділи, сприяє зниженню рівня смертності внаслідок пожеж [3].

Таким чином, актуальною є проблема невідповідності територіального розміщення пожежних підрозділів та їх функціональних спроможностей щодо ефективної ліквідації пожеж в зоні їх обслуговування.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [4] проаналізовано статистику пожеж в містах, взаємозв'язки між соціально-економічними факторами і різними типами пожеж, виявлено часові тенденції. При цьому можливості покращення реагування пожежних підрозділів на аварійні ситуації залишено поза увагою. В [5] проаналізовано вплив заторів на час слідування пожежних підрозділів до місця виклику в міських умовах. На конкретному прикладі з'ясовано, що час слідування пожежних підрозділів складає близько 80 % від часу, необхідного звичайному транспорту для проходження того самого маршруту. Але задачу оптимального вибору зон обслуговування для пожежних підрозділів не розглянуто. В [6] розглянуто затримки в дорозі служб екстреної допомоги, викликані необхідністю очікування проїзду через залізничний переїзд. Запропоновано корегувати маршрути служб екстреної допомоги з урахуванням поточного розкладу руху поїздів. При цьому можливість перерозподілу зон обслуговування таким чином, щоб уникнути переїзду через залізничні колії, залишено поза увагою. В [7] запропоновано динамічну зміну зон обслуговування в залежності від даних про завантаженість доріг, отриманих з онлайн карт. Результати показують, що якщо виходити із нормативу на час прибуття, то фактична зона обслуговування виявляється меншою за нормативну. В [8] досліджуються мережі міських доріг і доступність одних пунктів із інших різними видами транспорту: громадським і приватним та зміна цієї величини протягом доби. Але питання руху спеціальної техніки до місця виклику не розглядаються. В [9] розглянуто проблему кількох одночасних викликів в невеликих селах, де на в наявності є лише один пожежний автомобіль. На основі статистичних даних визначено час і райони, з найбільшою ймовірністю одночасних викликів. Недоліком такого підходу є складність його розповсюдження на інші міста та села. В [10] досліджено вплив соціально-демографічних, інфраструктурних, сезонних, часових факторів на час відгуку на повідомлення про екстрену ситуацію. Але питання зменшення цього часу залишено без розгляду. В [11] запропоновано модель оцінки просторової конфігурації пожежних частин, яка спирається на статистику викликів і часу прямування до точок виклику при різній завантаженості доріг. Але питання оптимізації зон обслуговування пожежних частин, або зміни їх розташування не розглянуті.

В [12] розглянуто аварійно-рятувальні спроможності пожежної частини і визначено фактори, які впливають на ці спроможності. Але питання просторового розміщення пожежних частин залишено без розгляду. В [13] досліджується ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. При цьому статистичні дані про пожежі залишаються неврахованими.

В [14] проаналізовано розташування пожежних частин і час слідування до місця виклику. Запропоновано нове розташування, яке забезпечує у 95% прибуття перших підрозділів на місце виклику не більше ніж за 5 хв. При цьому до реорганізації вкластися у 5 хв. вдавалося лише у 81% випадків. Але при цьому не враховано складність пожежі і час прибуття наступних підрозділів. В [15] враховано необхідність прибуття різних видів техніки з різних пожежних підрозділів до місця аварії. Необхідна кількість техніки та пожежних підрозділів для кожної потенційної точки виклику прийнята на підставі нормативних документів. Показано, що побудована задача цілочисельного програмування є NP-складною задачею, яка може бути розв'язана за прийнятний проміжок часу. Недоліком моделі є неврахування аварій різного рівню складності на одному й тому самому об'єкті, а та-

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

кож неврахування частот аварій. В [16] для розв'язання задачі покриття і оптимального розташування об'єктів використано методи теорії нечіткої логіки. Але в цій моделі розглядається лише один тип транспортного засобу. В [17] побудовано модель просторової оптимізації для розташування систем громадського обслуговування таких, як лікарні або пожежні частини. Критерієм оптимізації є мінімум переміщень вже існуючих об'єктів або мінімум зайнятих земельних ділянок. Але і при такому підході не враховано різні види пожежної техніки (автоцистерни, автодрабина тощо), які є в пожежних частинах. В [18] запропоновано двоцільову модель просторової оптимізації розміщення пожежних частин, представлено процедуру вирішення на основі обмежень для генерації межі Парето. Але й тут залишається неврахованою складність пожежі і можливість залучення додаткових сил і засобів для її ліквідації.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є оптимізація зон обслуговування пожежним підрозділами таким чином, щоб забезпечувати вчасне прибуття не лише перших підрозділів, а функціонально спроможних ліквідувати цей тип пожежі.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є побудова алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами. На практиці це відкриває можливості для зменшення часу слідування пожежних підрозділів до місця виклику за рахунок зміни зон обслуговування підрозділами.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

– розробити модель визначення зон обслуговування пожежними підрозділами;

– розробити процедуру визначення оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес функціонування пожежних підрозділів, а предметом дослідження – розподіл техніки між підрозділами, що обслуговують певну область. Основна гіпотеза дослідження – апріорі відомі частоти пожеж та сили і засоби необхідні для їх ліквідації.

Модель оптимального розподілу техніки між пожежним підрозділами базується на методах просторового геометричного моделювання. Цільовою функцією є мінімізація часу прибуття пожежних підрозділів до місця виклику з урахуванням функціональної спроможності цих підрозділів ліквідувати пожежу. Для дослідження властивостей розв'язку задачі оптимізації використовуються властивості опуклих областей припустимих значень і опуклої функції цілі. Для побудови алгоритму знаходження оптимального розв'язку задачі використовуються методи математичного програмування.

5. Результати побудови алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами

5.1. Розробка моделі визначення зон обслуговування пожежними підрозділами

З практичної точки зору важливим є не лише якнайшвидше прибуття на пожежу перших підрозділів, а прибуття тієї кількості сил і засобів, які забезпечують проведення рятувальних робіт і ліквідацію пожежі. Це означає, що при виборі зон

обслуговування має бути врахована складність потенційних пожеж, що виникають на об'єктах, які знаходяться в зоні обслуговування, а також сили і засоби, наявні в сусідніх підрозділах. Зокрема, можлива ситуація, коли ліквідація пожежі на певному об'єкті буде вимагати залучення кількох підрозділів. Це буде означати, що даний об'єкт знаходиться в зоні обслуговування цих підрозділів. На рис. 1 наведено приклад виділення окремих об'єктів в зоні обслуговування пожежного підрозділу.

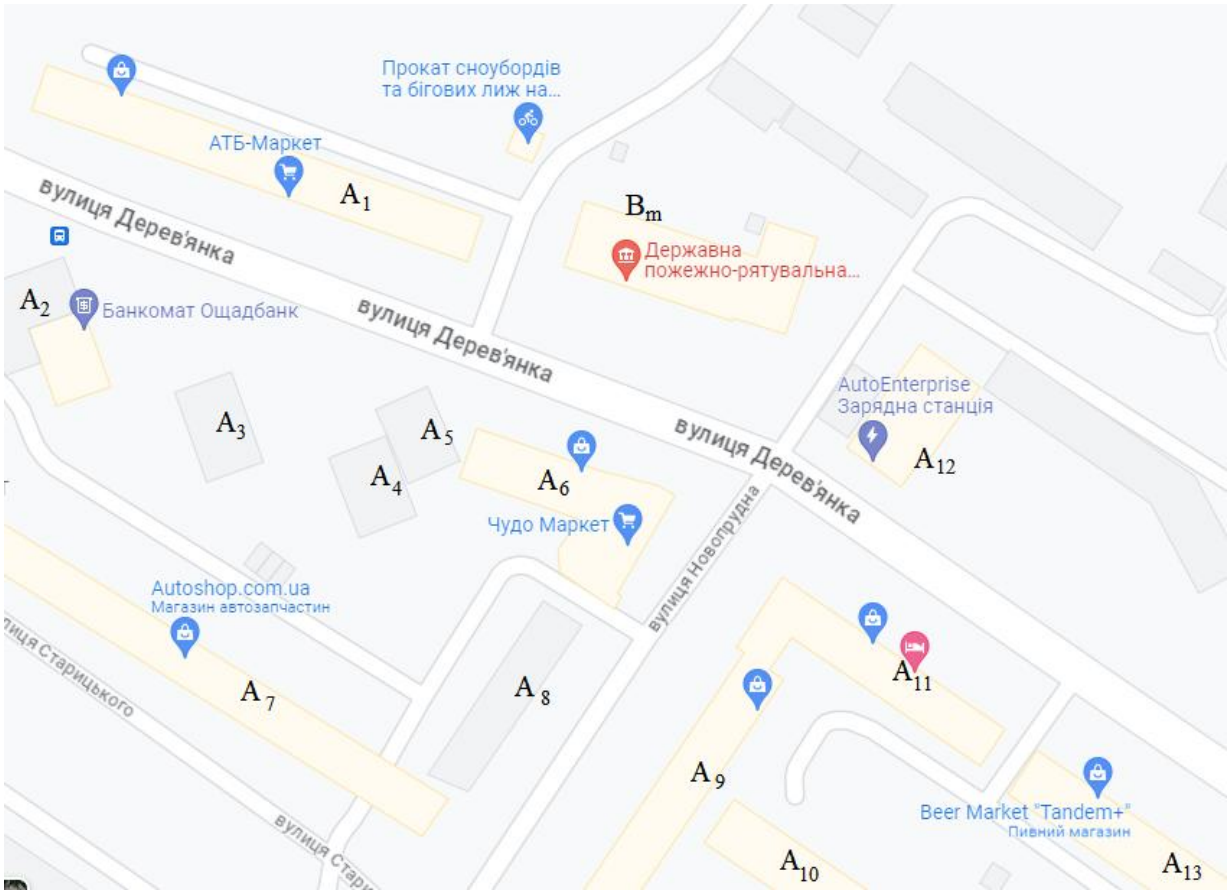


Рис. 1. Приклад виділення окремих об'єктів A_1, A_2, A_3, … в області обслуговування пожежного підрозділу B_m

При побудові моделі оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами будемо виходити з наступних припущень.

1. В області обслуговування, що розглядається, знаходяться M пожежних підрозділів: B_1, B_2, …, B_M.

2. В кожному підрозділу B_m знаходиться техніка виду C_1, C_2, …, C_L у кількості y_{m1}, y_{m2}, …, y_{mL} одиниць відповідно. Тоді загальний розподіл техніки по підрозділам може бути представлений у вигляді матриці

$$Y = \left\| y_{m\ell} \right\|,$$

елемент якої, що знаходиться в рядку m і стовпчику ℓ, відповідає кількості техніки виду C_ℓ у підрозділі B_m.

3. В області обслуговування вказаних підрозділів знаходяться N об'єктів: A_1, A_2, …, A_N.

4. На кожному з об'єктів A_n можуть виникнути пожежі різного типу або

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

складності: S_{n1}, S_{n2}, …, S_{nK} з частотою λ_{n1}, λ_{n2}, …, λ_{nK} (кількість пожеж протягом року).

5. Для ліквідації пожежі S_{nk}, що виникла на об'єкті A_n, необхідно залучити $a_1^{(nk)}$ одиниць техніки виду C_1, $a_2^{(nk)}$ одиниць техніки виду C_2, …, $a_L^{(nk)}$ одиниць техніки виду C_L.

6. Час слідування від місця розташування підрозділу B_m до об'єкта A_n складає t_{mn}.

7. Загальна кількість техніки, що знаходиться в розпорядженні підрозділів, достатня для ліквідації будь-якої аварійної ситуації S_{nk}.

$$a_\ell^{(nk)} \le \sum_{m=1}^{M} y_{m\ell}\,,\ \ell = 1, 2, ..., L\,.$$

8. Час ліквідації пожежі є достатньо малим настільки, що протягом цього часу не виникає пожежа на іншому об'єкті.

Розглянемо залучення сил і засобів для ліквідації пожежі S_{nk}, що виникла на об'єкті A_N. Для визначення тих підрозділів, з яких саме буде залучатися техніка для ліквідації аварійної ситуації S_{nk}, будемо виходити з критерію мінімуму часу слідування до місця аварії:

$$F_{nk} = \sum_{\ell=1}^{L}\sum_{m=1}^{M} x_{m\ell} t_{mn} \to \min\,. \tag{1}$$

з обмеженнями:

$$x_{m\ell} \le y_{m\ell}\,,\ \ell = 1,2,...,L\,;\ m = 1,2,...,M\,. \tag{2}$$

$$\sum_{m=1}^{M} x_{m\ell} = a_\ell^{(nk)},\ \ell = 1,2,...,L\,, \tag{3}$$

де $x_{m\ell}$ – кількість техніки виду C_ℓ, залучена з підрозділу B_m.

Для розв'язання задачі (1)–(3) може бути застосований наступний алгоритм.

1. Упорядковуємо підрозділи B_1, B_2, …, B_M за зростанням часу слідування t_{mn} до об'єкта A_n. Тим самим отримаємо послідовність підрозділів:

$$B_{m_1}, B_{m_2}, ..., B_{m_M}\,,$$

для якої

$$t_{m_1 n} \le t_{m_2 n} \le ... \le t_{m_M n}\,.$$

2. Покладаємо ℓ=1.
3. Покладаємо S=0, i=0.
4. Кількість техніки $x_{m_i\ell}$, що залучається з підрозділу m_i, визначається виразом:

$$x_{m_i\ell} = \min\left\{a_\ell^{(nk)} - S, y_{m_i\ell}\right\}.$$

5. Оновлюємо кількість вже залученої техніки:

$$S := S + x_{m_i\ell};$$
$$i := i + 1.$$

6. Якщо $i \le M$, то переходимо до кроку 4.
7. Переходимо до наступного виду техніки:

$$\ell := \ell + 1.$$

8. Якщо $\ell \le L$, то переходимо до кроку 3.

Результатом виконання наведеного алгоритму буде матриця:

$$X_{nk} = \left\| x_{m\ell} \right\|, \tag{4}$$

елементами якої є кількість техніки, що залучається до ліквідації пожежі S_{nk}. При цьому номер рядка m відповідає підрозділу B_m, з якого залучається техніка, а номер стовпчика ℓ відповідає виду техніки C_ℓ. Позначимо через F_{nk}^* – значення функції цілі (1) при значеннях (4), отриманих як розв'язок задачі (1)–(3).

Розв'язавши задачу (1)–(3) для всіх можливих аварійних ситуацій, отримаємо множину матриць X_{nk}, n = 1,2, …, N; k = 1,2, …, K, які будуть визначати області відповідальності окремих підрозділів.

Розглядаючи F_{nk}^* як функцію від наявної техніки в підрозділах

$$F_{nk}^* = F_{nk}^*(Y), \tag{5}$$

відзначимо, що ця функція є монотонно незростаючою. Дійсно, із наведеного вище алгоритму випливає, що збільшення кількості будь-якого виду техніки в будь-якому підрозділі призводить до того, що значення цільової функції (1) зменшується або залишається незмінним.

5.2. Розробка процедури визначення оптимального розподілу техніки між підрозділами

Враховуючи частоту λ_{nk} виникнення пожежі S_{nk} на об'єкті S_n, що знаходиться в області обслуговування пожежних підрозділів B_1, B_2, …, B_M, запишемо загальну функцію цілі:

$$F(Y) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{k=1}^{K} \lambda_{nk} F_{nk}^*(Y). \tag{6}$$

Оскільки F(Y) є лінійною комбінацією монотонно незростаючих функцій $F_{nk}^*(Y)$, то вона, в свою чергу також буде монотонно незростаючою.

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

Використовуючи (1) в для побудови критерію оптимальності, отримаємо функцію цілі:

$$F(Y) \to \min_{Y}. \tag{7}$$

Обмеженнями задачі є кількість наявної техніки кожного виду:

$$\sum_{m=1}^{L} y_{m\ell} = c_{\ell},\ \ell = 1,2,...,L, \tag{8}$$

$$y_{m\ell} \geq 0,\ m = 1,2,...,M,\ \ell = 1,2,...,L. \tag{9}$$

де c_{ℓ} – загальна доступна кількість техніки виду C_{ℓ}. Отже, цільова функція (7) разом з обмеженнями (8), (9) визначають задачу мінімізації, розв'язок Y^{*} якої описує оптимальний розподіл техніки по пожежних підрозділах.

Враховуючи, що функція (6) є монотонно незростаючою, а область допустимих значень (8), (9) є опуклою, то оптимальне значення буде досягатися на межі області.

Тоді для розв'язання задачі (7)–(9) може бути використаний наступний алгоритм (рис. 2).

1. Покладаємо ℓ=1 і розглядаємо окремо розподіл техніки виду C_{ℓ}.
2. Обираємо довільний початковий розподіл $y_{1\ell}$, $y_{2\ell}$, …, $y_{M\ell}$ техніки по підрозділам, який задовольняє умовам (8), (9).
3. Обчислюємо значення:

$$F^{*} = F(y_{1\ell}, y_{2\ell},...,y_{M\ell}).$$

4. Покладаємо i = 1.
5. Покладаємо j = 1.
6. Якщо $i \neq j$, $y_{i\ell} > 0$, то розраховуємо величину:

$$F_{ij} = F(y_{1\ell}, y_{2\ell},...,y_{i\ell} - 1,...,y_{j\ell} + 1,...,y_{M\ell}).$$

7. Якщо j < M, то покладаємо j := j + 1 та переходимо до п. 6.
8. Якщо i < M, то покладаємо i := i + 1 та переходимо до п. 5.
9. Серед всіх значень $\{F_{ij}\}$ обираємо найменше $F_{i_0 j_0}$.
10. Якщо

$$F_{i_0 j_0} \geq F^{*},$$

то переходимо до п. 12.

11. Переходимо до нового розподілу:

$$Y = (y_{1\ell}, y_{2\ell},...,y_{i_0\ell} - 1,...,y_{j_0\ell} + 1,...,y_{M\ell}).$$

і переходимо до п. 3.

12. Якщо $\ell < L$, то покладаємо $\ell := \ell + 1$ та переходимо до п. 2.

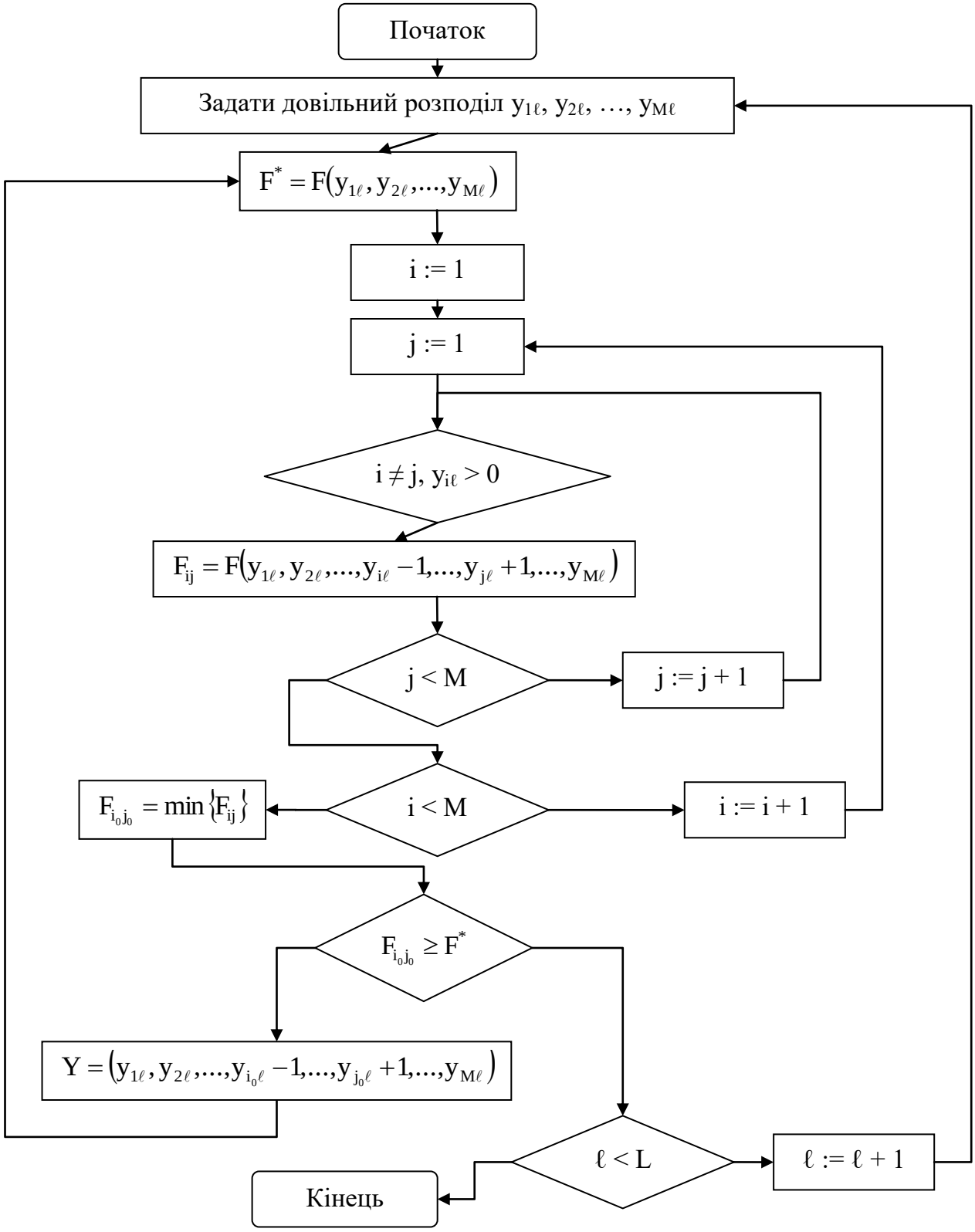


Рис. 2. Визначення оптимального розподілу техніки між підрозділами

Результатом виконання алгоритму є розподіл Y^* техніки по пожежних підрозділах, оптимальний в тому сенсі, що він забезпечує мінімальне значення цільової функції (7).

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

6. Обговорення результатів побудови алгоритму оптимального розподілу техніки між пожежними підрозділами

Запропонована модель визначення зон обслуговування пожежними підрозділами спирається на припущення про достатність сил та засобів в підрозділах для проведення рятувальних робіт і ліквідації пожеж в області їх обслуговування. Модель виходить із розбиття всієї області відповідальності на окремі підобласті або виділення окремих об'єктів, для яких відомий перелік можливих аварійних ситуацій, пов'язаних з пожежами, їх частота, сили і засоби, необхідні для їх ліквідації. Джерелом такої інформації можуть бути статистичні дані щодо пожеж на таких об'єктах або розрахункові дані щодо рівня пожежної небезпеки [19]. Збитки від пожежі лінійно залежать від часу прибуття пожежних підрозділів та їх розгортання для початку гасіння пожежі. При цьому важливим є не лише швидке прибуття перших пожежних підрозділів, а прибуття сил і засобів у кількості, достатньої для ліквідації пожежі. Тому цільова функція (1) являє собою суму добутків кількості одиниць техніки і слідування часу до місця виклику від місць розташування пожежних підрозділів. Це дозволяє врахувати складність пожежі, оскільки більш складні пожежі будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділів. Отже, одиницею виміру цільової функції є машино-хвилини, а критерієм оптимізації є мінімум машино-хвилин слідування пожежних підрозділів до місця виклику. При цьому час слідування підрозділів від місця їх розташування до місця пожежі може бути визначений за допомогою он-лайн карт, зокрема, Google Maps.

Мінімізація цільової функції (1) за умови виконання обмежень (2), (3) дозволяє розв'язати задачу про оптимальний вибір підрозділів, які мають залучатися до ліквідації пожежі певного типу на даному об'єкті. Алгоритм знаходження розв'язку полягає в визначенні підрозділу, розташованого найближче всього до місця виклику (найменший час слідування до місця пожежі). Якщо сил і засобів цього підрозділу недостатньо для ліквідації пожежі, то залучається наступний за часом слідування підрозділ і т.д. Такий підхід стає можливим завдяки припущенню про неможливість одночасного виникнення кількох пожеж на різних об'єктах. Складність наведеного алгоритму (час його виконання) має оцінку O(M·lnM), що обумовлено необхідністю упорядкування M підрозділів за зростанням часу слідування від місця розташування до місця виклику.

Послідовне розв'язання задачі (1)–(3) для кожної з можливих пожежних ситуацій на кожному з об'єктів дозволяє визначити зони обслуговування для кожного з підрозділів, що розглядаються. Складність такого алгоритму можна оцінити як O(N·M·lnM) внаслідок того, що упорядкування підрозділів за відстанню до об'єктів в області обслуговування необхідно проводити для кожного об'єкта.

Підстановка в цільову функцію (1) розв'язку задачі (1)–(3) дає функцію (5), яка є монотонно незростаючою відносно змінних $y_{m\ell}$, які означають кількість одиниць техніки виду ℓ в підрозділі m. Із тієї властивості, що функції виду (5) є монотонно незростаючими, випливає що їх лінійна комбінація (6) також є монотонно незростаючою. Отже, розв'язок задачі (1)–(3) є основою для побудови і розв'язання задачі (7)–(9) оптимального розподілу техніки між підрозділами. Включення річних частот пожеж λ_{nk} на об'єктах, що лежать в області обслуговування, в цільову функцію (7) означає, що функція (7) є математичним очікуванням машино-хвилин слідування на пожежу протягом року.

Обмеження (8), (9) описують опуклу область припустимих рішень задачі (7)–(9). В сукупності із тим, що функція цілі (7) є монотонно незростаючою, це

означає, що розв'язок задачі оптимізації (7)–(9) лежить на межі області припустимих значень. Крім того, будь-який локальний розв'язок задачі (7)–(9) буде одночасно її глобальним розв'язком. Це дозволяє застосувати наведений алгоритм для знаходження розв'язку задачі (7)–(9). Складність алгоритму (рис. 2) може бути оцінена як $O(N \cdot P \cdot M^3 \cdot \ln M)$, де P – середня кількість одиниць техніки одного типу у підрозділі.

Перевагою побудованої моделі є те, що вона враховує не лише відстань від місця розташування пожежних підрозділів до об'єктів, які знаходяться в зоні їх обслуговування, а й складність пожеж. Це досягається шляхом введення в цільову функцію як часу слідування до місця виклику, так і кількості техніки.

До обмежень моделі слід віднести припущення про сталий час слідування від пожежної частини до місця виклику незалежно від часу доби та пори року.

Недоліком побудованого алгоритму є те, що він виходить із припущення про неможливість одночасного виникнення кількох пожеж на різних об'єктах. Це призводить до неможливості розгляду задачі оптимізації на достатньо великій території, оскільки ймовірність одночасного виникнення більше ніж однієї пожежі вже не можна ігнорувати. Таким чином, перспективи подальших досліджень пов'язані із врахуванням ймовірності одночасного виникнення кількох пожеж.

Запропонований алгоритм може бути використаний для визначення зон обслуговування вже існуючих пожежних підрозділів [13], а також при виборі місць розташування додаткових пожежних підрозділів.

7. Висновки

1. Сформульовано задачу оптимального визначення області відповідальності рятувальних підрозділів. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування підрозділів від місця розташування до місця виклику. Цільова функція включає в себе як час слідування, так і кількість одиниць техніки, залученої до ліквідації аварії. Це дозволяє врахувати складність аварійної ситуації, оскільки більш складні ситуації будуть вимагати залучення більшої кількості техніки і підрозділі. Обмеження задачі визначаються наявними силами і засобами в оперативно-рятувальних підрозділах. Побудовано алгоритм розв'язання задачі оптимізації. Його складність пропорційна загальній кількості об'єктів, що потрапляють в зону відповідальності підрозділів, і пропорційна добутку кількості підрозділів на їх логарифм і обумовлена необхідністю упорядкування підрозділів за зростанням відстані до кожного потенційного місця аварії.

2. Побудовано процедуру оптимального розподілу техніки між існуючими оперативно-рятувальними підрозділами. Критерієм оптимізації є мінімум часу слідування до місця потенційної аварії. Показано, що область припустимих рішень є опуклою. Це забезпечує, що знайдений із використанням алгоритму локальний мінімум буде одночасно і глобальним. При пошуку оптимального розв'язку використовується розв'язок задачі щодо оптимального вибору областей відповідальності підрозділів. Складність алгоритму пропорційна третій степені кількості аварійно-рятувальних підрозділів і загальній кількості об'єктів, що знаходяться в області їх відповідальності.

Література

1. Xia Z., Li H., Chen Y., Yu W. Integrating Spatial and Non-Spatial Dimensions to Measure Urban Fire Service Access. ISPRS International Journal of Geo-

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

Information. 2019. Vol. 8(3). P. 138. doi: 10.3390/ijgi8030138

2. Murray A. T. Optimising the spatial location of urban fire stations. Fire Safety Journal. 2013. Vol. 62. Part A. P. 64–71. doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.002

3. Oh J. Y., Hessami A., Yang H. Y Minimizing Response Time with Optimal. Studies in Engineering and Technology. 2019. Vol. 6(1). P. 47–58. doi: 10.11114/set.v6i1.4187

4. Corcoran J., Higgs G., Higginson A. Fire incidence in metropolitan areas: A comparative study of Brisbane (Australia) and Cardiff (United Kingdom). Applied Geography. 2011. Vol. 31(1). P. 65–75. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.02.003

5. Zhu S., Liu W., Liu D., Li Y. The impact of dynamic traffic conditions on the sustainability of urban fire service. Sustainable Cities and Society. 2023. Vol. 96. P. 104667. doi: 10.1016/j.scs.2023.104667

6. Park P. Y., Jung W. R., Yeboah G., Rempel G., Paulsen D., Rumpel D. First responders' response area and response time analysis with/without grade crossing monitoring system. Fire Safety Journal. 2016. Vol. 79. P. 100–110. doi: 10.1016/j.firesaf.2015.11.003

7. Liu D., Xu Z., Yan L., Fan C. Dynamic estimation system for fire station service areas based on travel time data. Fire Safety Journal. 2020. Vol. 118. P. 103238. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103238

8. Guan J., Zhang K., Shen Q., He Y. Dynamic Modal Accessibility Gap: Measurement and Application Using Travel Routes Data. Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2020. Vol. 81. P. 102272. doi: 10.1016/j.trd.2020.102272

9. Yeboah G., Park P. Y. Using survival analysis to improve pre-emptive fire engine allocation for emergency response. Fire Safety Journal. 2018. Vol. 97. P. 76–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.02.005

10. KC K., Corcoran J. Modelling residential fire incident response times: A spatial analytic approach. Applied Geography. 2017. Vol. 84. P. 64–74. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.03.004

11. Xu Z., Liu D., Yan L. Evaluating spatial configuration of fire stations based on real-time traffic. Case Studies in Thermal Engineering. 2021. Vol. 25. P. 100957. Doi: 10.1016/j.csite.2021.100957

12. Chen M., Wang K., Dong X., Li H. Emergency rescue capability evaluation on urban fire stations in China. Process Safety and Environmental Protection. 2020. Vol. 135. P. 59-69. doi: 10.1016/j.psep.2019.12.028

13. Кустов М. В., Федоряка О. І., Корнієнко Р. В. Ефективність методу територіального розміщення пожежних підрозділів різної функціональної спроможності. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2022. № 2(36). С. 54–65. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-5

14. Shahparvari S., Fadaki M., Chhetri P. Spatial accessibility of fire stations for enhancing operational response in Melbourne. Fire Safety Journal. 2020. Vol. 117. P. 103149. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103149

15. Wang J., Liu H., An S., Cui N. A new partial coverage locating model for cooperative fire services. Information Sciences. 2016. Vol. 373. P. 527–538. doi: 10.1016/j.ins.2016.06.030

16. Batanović V., Petrović D., Petrović R. Fuzzy logic based algorithms for maximum covering location problems. Information Sciences. 2009. Vol. 179(1–2). P. 120–129. doi: 10.1016/j.ins.2008.08.019

17. Chen H., Xu R. Achieving Least Relocation of Existing Facilities in Spatial

Optimisation: A Bi-Objective Model. 12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023). 2023. Vol. 277. P. 19:1–19:5. doi: 10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.19

18. Yao J., Zhang X., Murray A. T. Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. Computers, Environment and Urban Systems. 2019. Vol. 73. P. 184–190. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006

19. Кустов М. В., Тютюник В. В., Федоряка О. І. Оцінка рівня пожежної небезпеки локальної території. Проблемы пожарной безопасности. 2020. № 48. С. 83–93. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb48/12.pdf

O. Basmanov, *Dsc, Professor, Chief Researcher of the Department*
D. Saveliev, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
R. Melezhyk, *Researcher of the Department*
T. Lutsenko, *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

AN ALGORITHM OF OPTIMAL DISTRIBUTION OF EQUIPMENT FOR FIRE STATIONS

The object of the study is the process of functioning of fire stations, and the subject of the study is the distribution of equipment between units serving a certain area. An algorithm of the optimal distribution of equipment for fire stations was built. In practice, it opens up opportunities to reduce the time it takes for firefighting units to reach the place of call by changing the service areas of the units. The model is based on the assumption of the sufficiency of forces and means in fire stations to carry out rescue operations and eliminate fires in the area of their service. The model is based on the division of the entire area of responsibility into separate sub-areas or the selection of individual objects for which a list of possible emergency situations related to fires, their frequency, forces and means necessary for their elimination is known. The task of optimally determining the area of responsibility of rescue units is formulated. The optimization criterion is the minimum time for units to follow from the location to the place of call. The objective function includes both the follow-up time and the number of units of equipment involved in eliminating the accident. This allows you to take into account the complexity of the emergency situation, since more complex situations will require the involvement of a larger number of equipment and units. The limitations of the task are determined by the available forces and means in operational and rescue units. An algorithm for the optimal distribution of equipment between existing operational and rescue units has been built. It is shown that the domain of admissible solutions is convex. The built model can be used to determine the service areas of already existing fire stations, as well as when choosing the locations of additional fire stations.

Keywords: local territory, level of danger, functional capacity, service area, location of fire stations

References

1. Xia, Z., Li, H., Chen, Y., Yu, W. (2019). Integrating Spatial and Non-Spatial Dimensions to Measure Urban Fire Service Access. ISPRS International Journal of Geo-Information, 8(3), 138. doi: 10.3390/ijgi8030138

2. Murray, A. T., Murray, A. T. (2013). Optimising the spatial location of urban fire stations. Fire Safety Journal, 62, Part A, 64–71. Doi: 10.1016/j.firesaf.2013.03.002

3. Oh, J. Y., Hessami, A., Yang, H. Y (2019). Minimizing Response Time with Optimal. Studies in Engineering and Technology, 6(1), 47–58. doi: 10.11114/set.v6i1.4187

4. Corcoran, J., Higgs, G., Higginson, A. (2011). Fire incidence in metropolitan areas: A comparative study of Brisbane (Australia) and Cardiff (United Kingdom). Applied Geography, 31(1), 65–75. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.02.003

5. Zhu, S., Liu, W., Liu, D., & Li, Y. (2023). The impact of dynamic traffic conditions on the sustainability of urban fire service. Sustainable Cities and Society, 96,

© О. Є. Басманов, Д. І. Савельєв, Р. С. Мележик, Т. О. Луценко

104667. doi: 10.1016/j.scs.2023.104667

6. Park, P. Y., Jung, W. R., Yeboah, G., Rempel, G., Paulsen, D., Rumpel, D. (2016). First responders' response area and response time analysis with/without grade crossing monitoring system. Fire Safety Journal, 79, 100–110. doi: 10.1016/j.firesaf.2015.11.003

7. Liu, D., Xu, Z., Yan, L., Fan, C. (2020). Dynamic estimation system for fire station service areas based on travel time data. Fire Safety Journal, 118, 103238. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103238

8. Guan, J., Zhang, K., Shen, Q., He, Y. (2020). Dynamic Modal Accessibility Gap: Measurement and Application Using Travel Routes Data. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 81, 102272. doi: 10.1016/j.trd.2020.102272

9. Yeboah, G., Park, P. Y. (2018). Using survival analysis to improve pre-emptive fire engine allocation for emergency response. Fire Safety Journal, 97, 76–84. doi: 10.1016/j.firesaf.2018.02.005

10. KC, K., Corcoran, J. (2017). Modelling residential fire incident response times: A spatial analytic approach. Applied Geography, 84, 64–74. doi: 10.1016/j.apgeog.2017.03.004

11. Xu, Z., Liu, D., Yan, L. (2021). Evaluating spatial configuration of fire stations based on real-time traffic. Case Studies in Thermal Engineering, 25, 100957. doi: 10.1016/j.csite.2021.100957

12. Chen, M., Wang, K., Dong, X., Li, H. (2020). Emergency rescue capability evaluation on urban fire stations in China. Process Safety and Environmental Protection, 135, 59–69. doi: 10.1016/j.psep.2019.12.028

13. Kustov, M., Fedoryaka, O., Kornienko, R. (2022). Effectiveness of the method of territorial placement of fire stations of different functional capacity. Problems of Emergency Situations, 2(36), 54–65. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-5

14. Shahparvari, S., Fadaki, M., Chhetri, P. (2020). Spatial accessibility of fire stations for enhancing operational response in Melbourne. Fire Safety Journal, 117, 103149. doi: 10.1016/j.firesaf.2020.103149

15. Wang, J., Liu, H., An, S., Cui, N. (2016). A new partial coverage locating model for cooperative fire services. Information Sciences, 373, 527–538. doi: 10.1016/j.ins.2016.06.030

16. Batanović, V., Petrović, D., Petrović, R. (2009). Fuzzy logic based algorithms for maximum covering location problems. Information Sciences, 179(1–2), 120–129. doi: 10.1016/j.ins.2008.08.019

17. Chen, H., Xu, R. (2023). Achieving Least Relocation of Existing Facilities in Spatial Optimisation: A Bi-Objective Model. 12th International Conference on Geographic Information Science (GIScience 2023), 277, 19:1–19:5. doi: 10.4230/LIPIcs.GIScience.2023.19

18. Yao, J., Zhang, X., Murray, A. T. (2019). Location optimization of urban fire stations: Access and service coverage. Computers, Environment and Urban Systems, 73, 184–190. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2018.10.006

19. Kustov, M., Tiutiunik, V., Fedoryaka, O. (2020). The fire safety level assessment of the local territory. Problems of fire safety, 48, 83–93. Available at: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/science/zbirky-naukovykh-prats-ppb/ppb48/12.pdf

Надійшла до редколегії: 25.09.2023
Прийнята до друку: 07.11.2023

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)*
В. О. Семків, *ад'юнкт (ORCID 0000-0002-1584-4754)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

СТАТИСТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ В МІСТАХ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

Досліджено процес виникнення пожеж в містах, які перебувають поблизу лінії розмежування під час дії воєнного стану. Предметом дослідження є статистичні закономірності, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в містах під час дії воєнного стану. Опрацьовано дані про пожежі, які траплялися в сімнадцяти міських населених пунктах України, котрі перебувають у безпосередній близькості від лінії розмежування за період 2022 року. Перевірені статистичні гіпотези, які дозволяють описати потік пожеж, які періодично траплялися в містах продовж досліджуваного періоду, а також інтервали часу між моментами їх виникнення. Встановлено, що кількість пожеж, які періодично виникають на території міст під час дії воєнного стану не можна описати законом розподілу Пуассона. Натомість для 59 % досліджуваних міст підтвердилася гіпотеза про геометричний закон розподілу. Для окремих міст у яких за період 2022 року кількість пожеж склала менше 50 не вдалося отримати жодного результату. Встановлено, що для 35 % від загальної кількості аналізованих міст висунута статистична гіпотеза про можливість опису часових інтервалів між моментами виникнення пожеж експоненційним законом розподілу була підтвердженою. У якості критерію узгодженості під час перевірки статистичних гіпотез було використано критерій Пірсона. Значно гірший результат було отримано під час перевірки можливості описання часових інтервалів між моментами виникнення пожеж іншими законами розподілу. Отже, при необхідності описання процесу виникнення пожеж в міських населених пунктах під час дії воєнного стану ймовірнісними закономірностями необхідно досліджувати кожний окремий випадок. Результати досліджень можуть бути використані для побудови інформаційних систем підтримки прийняття рішень керівним складом, який залучається до ліквідації наслідків небезпечних подій і надзвичайних ситуацій, які пов'язані з пожежами.

Ключові слова: пожежа, воєнний стан, статистична гіпотеза, закон розподілу, аварійно-рятувальне формування, критерій Пірсона

1. Вступ

Процес реагування аварійно-рятувальних формувань на небезпечні події і надзвичайні ситуації, які виникають під час дії воєнного стану надто ускладнюється. Причиною цього є поява нових видів небезпек для особового складу, який до цього залучається та значне збільшення об'ємів оперативної роботи. Підвищити ефективність реагування аварійно-рятувальних формувань на небезпечні події та надзвичайні ситуації, які виникають дозволяють різноманітні інформаційні системи підтримки прийняття рішень. З їх допомогою можна виконати прогноз кількості небезпечних подій і надзвичайних ситуацій, котрі можуть виникнути на окремій території за певний проміжок часу. Це дозволяє спрогнозувати потенційні масштаби оперативної роботи, що дає можливість попередньо підготувати до цього необхідну кількість особового складу та технічних засобів. В основі кожної автоматизованої системи управління знаходиться певний встановлений алгоритм, який включає в себе, зокрема, математичні моделі, які дозволяють описати різні етапи досліджуваного процесу. Як було вказано раніше, процес реагування аварійно-рятувальних формувань на надзвичайні ситуації і небезпечні події до і після введення воєнного стану сильно відрізняється. За цих умов виникають сумніви щодо рівня достовірності отриманих результатів через опис процесу виникнення

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

небезпечних подій і надзвичайних ситуацій, а серед них частіше всього пожеж математичними моделями, які використовувалися раніше.

Отже, дослідження процесу виникнення небезпечних подій і надзвичайних ситуацій, які пов'язані з виникненням пожеж під час дії воєнного стану є актуальним. Одержані результати можуть бути використані для опису вказаного процесу математичними моделями та побудови з їх допомогою інформаційних систем підтримки прийняття рішень з метою підвищення ефективності реагування аварійно-рятувальних формувань.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

В [1] пропонується комплексний показник для оцінки рівня готовності аварійно-рятувальних формувань до виконання дій за призначенням. Цей комплексний показник ґрунтується на врахуванні ряду імовірнісних показників. До них належать показники, які враховують ймовірність достатньої кількості техніки, її готовність до застосування і ймовірність безвідмовної роботи впродовж часу виконання оперативних робіт. Крім цього, сюди входять імовірнісні показники, які враховують можливі випадки, коли кількості залученого особового складу буде достатньо і рівень їх підготовки буде відповідати покладеним завданням. Математично ці показники описуються відомими статистичними закономірностями, які дозволяють описати закон розподілу випадкової величини, а чи дійсно вони виконуються в умовах дії воєнного стану в цій роботі не перевірялося.

В [2] досліджено залежність зміни фізико-механічних властивостей напірних пожежних рукавів діаметром 77 мм у внутрішній порожнині яких створювався гідравлічний тиск під час їх розтягу у поперечному напрямку. Дослідні зразки, які були використані під час досліджень мали одиночні пошкодження у вигляді порізів певної фіксованої глибини та довжини. В умовах воєнного стану під час гасіння пожеж, які виникають в результаті ворожих обстрілів через значну кількість уламків кількість і характер порізів рукавів може змінитись. За цих умов під час оцінки ймовірності безвідмовної роботи пожежно-технічного оснащення ця особливість повинна бути врахована, бо напірні пожежні рукава мають достатньо низьку надійність.

В [3] запропоновано три варіанти концептуальних підходів до створення інформаційно-аналітичної експертної системи для оцінки екологічного впливу атомних електростанцій на навколишнє природне середовище. В структурі кожної з інформаційно-аналітичної системи містяться блоки, які відповідають за проведення моніторингу різних зовнішніх чинників. Вплив воєнного стану на зміну цих чинників та можливі ризики, які можуть спричинити аварійну ситуацію на атомній електростанції в цій роботі не розглядалися.

В [4] проаналізовані можливі причини виникнення аварійних ситуацій на атомних електростанціях. Це дозволило запропонувати заходи щодо мінімізації ризиків їх виникнення у майбутньому. Крім цього, була досліджена динаміка виникнення аварійних ситуацій на атомних електростанціях але дослідження щодо можливості її опису статистичними закономірностями в роботі не проводилося. В жодній місцевості в якій відбулися ці аварійні ситуації військового стану введено не було, тому ризики які могли бути з ним пов'язані і впливати на їх появу також не розглядалися.

В [5] пропонується метод вибору кращого варіанту об'єднання підрозділів

аварійно-рятувальних формувань, які спільно розміщуються на території однієї адміністративно-територіальної одиниці. Для цього використовується метод експертних оцінок під час якого оцінюються різні можливі варіанти з урахуванням 61 критерію, що об'єднані в шість окремих груп. Окремі з критеріїв, які оцінюються, наприклад, ймовірні ризики повинні визначатися з використанням методів математичної статистики та теорії ймовірності. На жаль, в роботі не наведено, яким саме чином визначаються числові значення критеріїв, котрі аналізуються.

В [6] запропоновано алгоритм переміщення відділень аварійно-рятувальних формувань на протипожежній техніці по території міста з урахуванням історії небезпечних подій та надзвичайних ситуацій, які виникали там раніше. Це необхідно для того щоб у періоди часу, коли найбільша ймовірність виникнення деструктивних подій поблизу цих місць забезпечити зосередження достатньої кількості оперативних відділень. Алгоритм полягає у реалізації декількох послідовних етапів. Ймовірна кількість подій, які можуть виникнути за певний проміжок часу оцінюється з використанням залежності, яку описує закон розподілу Пуассона. Оцінка рівня достовірності прогнозів з використанням цього закону розподілу під час дії воєнного стану в цій роботі не проводилася.

В [7] запропоновано метод комплектування аварійно-рятувальних формувань оперативними транспортними засобами з урахуванням оперативної обстановки в їх районах виїзду на основі ймовірнісної оцінки. В основі залежності, яка дозволяє оцінити ймовірність зайнятості певної кількості оперативних транспортних засобів використовується закон розподілу Пуассона. Достовірність цього методу перевірялася до введення воєнного стану, тому можливість його використання під час воєнного стану викликає сумнів і тому потребує перевірки.

У [8] запропоновано комбінований метод прогнозування процесу виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру. Цей комбінований метод поєднує у собі метод регресійного аналізу, метод перевірки статистичних гіпотез та метод групового розгляду аргументів. Відповідно, при прогнозуванні процесу виникнення надзвичайних ситуацій на основі відомих статистичних даних за певний часовий період необхідно застосовувати метод перевірки статистичних гіпотез для математичного опису закону розподілу випадкових величин. Під час дослідження динаміки виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру було встановлено, що вона може бути описана рівнянням регресії у вигляді поліному.

В [9] досліджено основні причини, закономірності виникнення і протікання надзвичайних ситуацій, які пов'язані з вибухами боєприпасів. Встановлено, що найчастіше ці види надзвичайних ситуацій трапляються в травні, червні та жовтні. Ця залежність в роботі була пояснена тим, що ймовірно більшість з планових робіт під час поводження з боєприпасами проводиться в теплий період року, при цьому, в травні ці роботи починаються, а в жовтні вони закінчуються. Математично названа залежність в роботі описана не була.

В [10] оцінку кількості пожеж в містах пропонується виконувати з використанням методу нейромережевого прогнозування. Цей метод вважається альтернативою відомим методам математичної статистики і теорії ймовірностей, які найбільш часто використовуються для прогнозування кількості пожеж. Точність прогнозування у випадку використання названого методу буде сильно залежати від обраної моделі навчання, що значно ускладнюється з урахуванням воєнного стану і потребує в таких умовах обов'язкової перевірки достовірності.

В [11] пропонується здійснювати прогнозування кількості небезпечних по-

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

дій та надзвичайних ситуацій, які пов'язані з дорожньо-транспортними пригодами використовуючи метод нейромережевого прогнозування. Для цього в роботі були опрацьовані дані про дорожньо-транспортні пригоди за період з 2007 по 2021 рік та враховуючи це проведено навчання нейронної мережі. В роботі вказано, що цей метод не є достатньо точним, тому під час прогнозування можна отримати значення з великою похибкою. З цієї причини отримані дані потребують перевірки рівня достовірності.

В [12] пропонується метод проведення аналізу та прогнозування сезону глобальних пожеж. Цей метод полягає у поділі досліджуваної території на комірки умовної сітки та збір статистичних даних про пожежі, які там виникають впродовж певного періоду часу. Отримані дані дозволяють побудувати часовий ряд і на основі його аналізу виконати прогноз. Точність прогнозу під час використання цього методу буде залежати від тривалості спостереження і чим вона буде більш тривалою, тим точнішим може бути прогноз.

В [13] пропонується проводити прогнозування кількості лісових пожеж з використанням методу регресійного аналізу шляхом побудови рівняння регресії. Встановлено, що кількість пожеж сильно залежить від такого чинника як сезонність. Однак встановлення статистичної закономірності, яка дозволяє описати динаміку виникнення лісових пожеж в часі в цій роботі не проводилося.

В [14] для прогнозування кількості лісових пожеж пропонується множинна лінійна регресійна модель, яка враховує попередні та поточні індекси літньої посухи. В цій роботі також встановлена залежність кількості пожеж від сезонності. Ця регресійна модель дозволяє отримати результати прогнозу з достатньо низькою точністю, що підтверджує значення коефіцієнту кореляції, який становить 0,49.

В [15] пропонується щоденна система прогнозування небезпеки виникнення лісових пожеж, яка полягає у використанні даних дистанційного зондування. До показників на основі яких виконують прогноз належать: температура повітря, вологість та стан лісового покриву. Досягнення встановлених граничних значень сукупності цих показників дозволяє виявити момент, коли виникає висока ймовірність виникнення пожежі. Відповідно, цей метод дозволяє отримати прогноз на достатньо короткий термін.

В [16] досліджено чинники, які впливають на кількість лісових пожеж і пропонується з урахуванням встановлених залежностей виконувати їх прогноз на майбутній період. Встановлено, що кількість пожеж негативно корелює з кількістю опадів і позитивно з вирубкою лісів. В роботі вказано, що саме кількість опадів є основним показником, який має слугувати для прогнозування кількості пожеж.

Отже, в деяких з проаналізованих робіт [6, 7] процес виникнення небезпечних подій та надзвичайних ситуацій у населених пунктах описується законом розподілу Пуассона. В окремих роботах [10, 11] для прогнозування їх кількості застосовуються методи нейромережевого прогнозування, але вони мають достатньо низьку точність. Низька точність також відноситься і до прогнозу кількості пожеж виконаного на основі проведення аналізу часових рядів [12]. Дещо вищу точність прогнозування має метод, який ґрунтується на побудові регресійних моделей [13–16]. Під час цього методу важливо визначити чинники, які мають високий вплив на кількість пожеж. Поряд з цим малодослідженим залишається процес виникнення пожеж в населених пунктах під час дії воєнного стану, а саме статистичних закономірностей, які здатні його описати.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є встановлення статистичних закономірностей, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в міських населених пунктах під час дії воєнного стану.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– встановити статистичний закон розподілу, який дозволяє описати кількість пожеж, які виникають в міських населених пунктах під час дії воєнного стану;

– встановити статистичний закон розподілу, який дозволяє описати часові інтервали між моментами виникнення пожеж, які виникають в міських населених пунктах під час дії воєнного стану.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процес виникнення пожеж в містах під час дії воєнного стану. Предметом дослідження є статистичні закономірності, які дозволяють описати процес виникнення пожеж в містах під час дії воєнного стану.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що процес виникнення пожеж в містах під час дії воєнного стану може бути описаний статистичними закономірностями.

Дослідження процесу виникнення пожеж в містах України, які територіально перебувають поблизу лінії розмежування відбувалося з використанням методів математичної статистики. З використанням табличного редактора Microsoft Excel були опрацьовані статистичні дані про пожежі, які виникали в містах за період 2022 року. Для перевірки висунутих статистичних гіпотез, які дозволяють описати процес виникнення пожеж було використано програмний продукт STATISTICA 6.0. У якості критерію узгодженості було використано критерій Пірсона. Для встановлення рівня взаємозалежності показника кількість пожеж від показників площа території населеного пункту та чисельність населення використано метод кореляційного аналізу.

5. Встановлення статистичного закону розподілу, який дозволяє описати кількість пожеж

Для досліджень були зібрані статистичні дані за період 2022 року про пожежі, які виникали на території міських населених пунктів України, котрі знаходяться поблизу лінії розмежування. Шляхом проведення кореляційного аналізу була встановлена залежність показника кількості пожеж від показників площа території населеного пункту та чисельність населення. Між кількістю пожеж і площею території встановлене значення коефіцієнта кореляції становило – 0,74, а для кількості пожеж і чисельності населення – 0,98.

З метою проведення більш глибокого аналізу населені пункти були поділені на окремі групи за критеріями площа території та чисельність населення. Поділ було проведено з використанням методів кластерного аналізу. Враховуючи те, що обрані критерії мають різну розмірність та числові значення спершу необхідно було виконати стандартизацію цих змінних. З цією метою було використано програмний продукт STATISTICA 6.0. Стандартизовані значення змінних наведені в табл. 1.

Далі поділ населених пунктів на групи виконувався шляхом проведення ієрархічного кластерного аналізу. Як міру відстані для ознак кластеризації було обрано евклідову метрику. Для побудови ієрархічної структури був використаний метод Варда. За результатами проведення ієрархічного кластерного аналізу було побудовано вертикальну дендрограму з якої наочно виділено три характерні

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

групи міських населених пунктів. Для перевірки точності отриманих у результаті ієрархічного кластерного аналізу даних було використано ітеративний метод групування k-середніх. Мірою відстані для ознак кластеризації в ітеративному методі групування k-середніх є евклідова метрика. Результати групування міських населених пунктів із застосуванням ітеративного методу групування k-середніх наведено в табл. 2.

Табл. 1. Стандартизовані значення змінних, які були використані для проведення кластерного аналізу

Назва міста	Область	Загальна площа	Середня чисельність населення
Бахмут	Донецька	-0,15712966	-0,304626918
Добропілля	Донецька	-0,63775417	-0,343918372
Дружківка	Донецька	-0,397441915	-0,328876854
Запоріжжя	Запорізька	1,32034568	1,4908189
Костянтинівка	Донецька	-0,228333291	-0,315780621
Краматорськ	Донецька	2,35279833	0,000832443294
Лозова	Харківська	-0,655555077	-0,333392891
Люботин	Харківська	-0,538959131	-0,442496935
Мирноград	Донецька	-0,611052808	-0,374034471
Новогродівка	Донецька	-0,762360524	-0,467207016
Первомайський	Харківська	-0,539849177	-0,426471754
Покровськ	Донецька	-0,468645546	-0,305271673
Селидове	Донецька	0,145485772	-0,370813454
Слов'янськ	Донецька	-0,15712966	-0,198052296
Торецьк	Донецька	-0,263935107	-0,322465128
Харків	Харківська	2,29957362	3,45884678
Чугуїв	Харківська	-0,700057347	-0,417089748

Табл. 2. Результати проведення кластерного аналізу ітераційним методом k-середніх

Номер кластеру	Місто	Область	Відстань до центру кластера
1	Запоріжжя	Запорізька	0,487362
	Краматорськ	Донецька	1,193999
	Харків	Харківська	1,297421
2	Бахмут	Донецька	0,017696
	Костянтинівка	Донецька	0,068631
	Селидове	Донецька	0,202239
	Слов'янськ	Донецька	0,075824
	Торецьк	Донецька	0,094225
3	Добропілля	Донецька	0,043124
	Дружківка	Донецька	0,141389
	Лозова	Харківська	0,057637
	Люботин	Харківська	0,056008
	Мирноград	Донецька	0,015815
	Новогродівка	Донецька	0,135812
	Первомайський	Харківська	0,047456
	Покровськ	Донецька	0,101667
	Чугуїв	Харківська	0,081538

Різниця між визначеними кластерами за критерієм евклідової відстані наведена в табл. 3.

Табл. 3. Евклідова відстань між кластерами

Номер кластеру	1	2	3
1	0	4,159962	5,396039
2	2,039598	0	0,108051
3	2,322937	0,328711	0

Для виділених груп міст було також розраховано значення показника стандартного відхилення показника кількість пожеж. Цей показник становив: для першої групи – 50,2, для другої групи – 12,5, для третьої групи – 10,4.

Наступним кроком була перевірка статистичної гіпотези про можливість описання процесу виникнення пожеж пуассонівським законом розподілу:

$$P_t(w) = (\lambda \cdot t)^w \cdot e^{-\lambda \cdot t} / w!, \quad (1)$$

де $P_t(w)$ – ймовірність виникнення w пожеж за час t; w – кількість можливих одночасних пожеж (1, 2, 3 …); λ – частота виникнення пожеж за час t; e – математична стала (число Ейлера).

Для цього було використано програмний продукт STATISTICA 6.0. У якості критерію узгодженості обрано критерій Пірсона. Критичні значення критерію Пірсона обиралися при рівні значущості 0,05. Результати перевірки названої раніше статистичної гіпотези наведені в табл. 4.

Табл. 4. Результати перевірки можливості описання процесу виникнення пожеж на території міських населених пунктів законом розподілу Пуассона

Місто	Розрахункове значення критерію Пірсона	Кількість ступенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Запоріжжя	193,3	4	9,5
Краматорськ	14,7	2	6
Харків	258,2	1	3,8
Бахмут	–	–	–
Костянтинівка	6,4	1	3,8
Селидове	1,9	1	3,8
Слов'янськ	17,6	1	3,8
Торецьк	23,4	1	3,8
Добропілля	27,3	1	3,8
Дружківка	5,8	1	3,8
Лозова	1,7	1	3,8
Люботин	–	–	–
Мирноград	16,5	1	3,8
Новогродівка	–	–	–
Первомайський	–	–	–
Покровськ	1,6	1	3,8
Чугуїв	3,96	1	3,8

Виходячи з даних, які наведені в табл. 4 висунута статистична гіпотеза підтверджена лише для міст Селидове, Лозова та Покровськ. За таких умов було прийнято рішення про подальшу перевірку можливості опису цього процесу іншими видами законів розподілу. До них належали: експоненційний, хі-квадрат та геометричний закони розподілу.

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

Найкращий результат було отримано під час перевірки статистичної гіпотези про можливість описання процесу виникнення пожеж геометричним законом розподілу, що підтверджують дані, які наведені в табл. 5.

Табл. 5. Результати перевірки можливості описання процесу виникнення пожеж на території міських населених пунктів геометричним законом розподілу

Місто	Розрахункове значення критерію Пірсона	Кількість ступенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Запоріжжя	58,6	7	14,1
Краматорськ	3,06	3	7,8
Харків	52,5	4	9,5
Бахмут	6,21	1	3,8
Костянтинівка	2,8	2	6
Селидове	0,99	1	3,8
Слов'янськ	1,9	1	3,8
Торецьк	5,1	2	6
Добропілля	9,5	1	3,8
Дружківка	0,14	1	3,8
Лозова	0,39	1	3,8
Люботин	0,49	1	3,8
Мирноград	4,2	1	3,8
Новогродівка	–	–	–
Первомайський	–	–	–
Покровськ	1,7	1	3,8
Чугуїв	0,56	1	3,8

З даних, які наведені в табл. 5 можна зробити висновок, що майже для 59 % досліджуваних міст висунута статистична гіпотеза підтвердилася.

6. Встановлення статистичного закону розподілу, який дозволяє описати часові інтервали

Спершу була перевірена статистична гіпотеза про те, що часові інтервали між моментами виникнення пожеж можуть бути описані експоненційним законом розподілу:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}, \quad (2)$$

де P(t) – функція розподілу; e – математична стала (число Ейлера); λ – частота виникнення пожеж за час t.

Для цього було використано програмний продукт STATISTICA 6.0. У якості критерію узгодженості обрано критерій Пірсона. Критичні значення критерію Пірсона обиралися при рівні значущості 0,05. Результати перевірки цієї статистичної гіпотези наведені в табл. 6.

Отже, експоненційним законом розподілу можна описати часові інтервали між моментами виникнення пожеж для шести із сімнадцяти аналізованих міст, що становить лише 35 % від загальної кількості. Перевірка описання часових інтервалів між моментами виникнення пожеж іншими законами розподілу позитивних результатів не дала.

7. Обговорення результатів встановлення статистичних закономірностей процесу виникнення пожеж в містах

Процес виникнення пожеж у більшості міст до дії воєнного стану міг бути описаний статистичними законами розподілу. Винятком могли бути міста з невеликою кількістю населення та площею, що також впливало на кількість пожеж, бо їх там виникало достатньо мало і через це не завжди вдавалося встановити закон розподілу випадкової величини. Щоб подолати цю проблему необхідно було збільшувати вибірку, тобто проводити дослідження за більш тривалий період часу. Відомо, що кількість пожеж сильно корелює з чисельністю населення і трохи меншими є кореляційні зв'язки з площею території міста. Під час дії воєнного стану чисельність населення міст, особливо у прифронтовій зоні, значно зменшилася, що безумовно мало вплив на кількість пожеж. Поряд з цим почали виникати пожежі через обстріли території міст. За вказаних умов достатньо важко передбачити можливість опису процесу виникнення пожеж на території міст під час воєнного стану відомими статистичними законами розподілу.

Табл. 6. Результати перевірки можливості описання часових інтервалів між моментами виникнення пожеж експоненційним законом розподілу

Місто	Розрахункове значення критерію Пірсона	Кількість ступенів свободи	Критичне значення критерію Пірсона
Запоріжжя	28,8	2	6
Краматорськ	10,9	7	14,1
Харків	193,2	2	6
Бахмут	–	–	–
Костянтинівка	13,97	4	9,5
Селидове	9,58	2	6
Слов'янськ	27,9	3	7,8
Торецьк	24,46	3	7,8
Добропілля	11,53	2	6
Дружківка	10,2	5	11,1
Лозова	0,89	2	6
Люботин	0,93	2	6
Мирноград	17,9	5	11,1
Новогродівка	1,66	1	3,8
Первомайський	4,9	2	6
Покровськ	14,02	5	11,1
Чугуїв	7,6	2	6

За результатами досліджень було встановлено, що кількість пожеж, які періодично виникають на території міст під час дії воєнного стану не можна описати законом розподілу Пуассона. З цієї причини було перевірено можливість опису цього процесу іншими законами розподілу випадкової величини, а саме: експоненційним, хі-квадрат та геометричним. Встановлено, що майже для 59 % досліджуваних міст справджується геометричний закон розподілу. Для міст Новогродівка та Первомайський не вдалося отримати жодного результату. Причиною цього може бути те, що в цих містах за період 2022 року сталася найменша кількість пожеж порівняно з іншими з аналізованих міст. Ця кількість не перевищує 50 для кожного з названих раніше міст. Крім цього, ці міста за результатами групування були віднесені до третього кластеру в який ввійшли населені пункти, які мали найменшу площу і чисельність населення.

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

Під час перевірки статистичної гіпотези, яка дозволяє описати часові інтервали між моментами виникнення пожеж в містах у якості основної гіпотези спершу було перевірено експоненційний закон розподілу. Встановлено, що для 35 % від загальної кількості аналізованих міст ця статистична гіпотеза справджується. Перевірка можливості описання часових інтервалів між моментами виникнення пожеж іншими законами розподілу дала значно гірший результат.

Проведення цього дослідження значно обмежували наявні статистичні дані, бо на початку повномасштабного вторгнення в деяких прифронтових містах з об'єктивних причин тимчасово був призупинений облік пожеж. Через це їх було вилучено з розгляду, тобто досліджувалася обмежена група міст.

Основним недоліком цього дослідження можна вважати те, що були опрацьовані статистичні дані за достатньо обмежений проміжок часу - лише за 2022 рік, тому це безумовно вплинуло на отримані результати. Усунути в перспективі вказаний недолік можливо шляхом продовження цього дослідження і опрацювання статистичних даних ще за період 2023 року.

Отже, під час необхідності описання процесу виникнення пожеж в міських населених пунктах під час дії воєнного стану статистичними закономірностями необхідно досліджувати кожний окремий випадок. Встановлено, що для деяких населених пунктів визначити статистичні закономірності, які дозволяють описати цей процес неможливо. Можливо це пов'язано з тим, що в цих містах за аналізований період відбулася невелика кількість пожеж і за умови збільшення інтервалу спостереження та повторної перевірки вдасться встановити статистичний закон розподілу. Вказане припущення планується перевірити під час подальших досліджень.

Встановлена сильна залежність показника кількості пожеж від площі території та чисельності населення міста. Названа залежність також спостерігалася до введення воєнного стану. Пояснити це можна тим, що значна кількість пожеж відбувається в об'єктах житлового фонду з причин, які не пов'язані з ворожими обстрілами. Враховуючи цю залежність можливим є проведення прогнозу кількості пожеж на майбутні періоди за рахунок побудови рівнянь регресії та використанні вказаних показників. При цьому, проблемою є встановлення достовірної чисельності населення на території міст, бо значна його кількість з введенням воєнного стану була переселена до інших населених пунктів.

В подальшому планується продовжити ці дослідження опрацювавши статистичні дані про пожежі, які виникали в містах за період 2023 року, що дозволить збільшити об'єм вибірки та отримати за рахунок цього більш достовірні результати.

8. Висновки

1. Встановлено, що кількість пожеж, які періодично виникають на території міст під час дії воєнного стану не можна описати законом розподілу Пуассона. Натомість для 59 % досліджуваних міст підтвердилася гіпотеза про геометричний закон розподілу. Для окремих міст у яких за період 2022 року кількість пожеж склала менше 50 не вдалося отримати жодного результату. Через це було зроблено припущення, що за умови збільшення інтервалу спостереження та проведення повторної перевірки можливо встановити статистичний закон розподілу. Встановлена сильна залежність показника кількості пожеж від площі території та чисельності населення міста. Між кількістю пожеж і площею території значення коефіцієнта кореляції становило – 0,74, а для кількості пожеж і чисельності населен-

ня – 0,98. Враховуючи цю залежність можливим є проведення прогнозу кількості пожеж на майбутні періоди за рахунок побудови рівнянь регресії та використанні вказаних показників. При цьому, проблемою є встановлення достовірної чисельності населення на території міст, бо значна його кількість з введенням воєнного стану була переселена до інших населених пунктів.

2. Встановлено, що для 35 % від загальної кількості аналізованих міст висунута статистична гіпотеза про можливість опису часових інтервалів між моментами виникнення пожеж експоненційним законом розподілу була підтвердженою. Під час перевірки можливості описання часових інтервалів між моментами виникнення пожеж іншими законами розподілу було отримано значно гірший результат. Отже, під час необхідності описання процесу виникнення пожеж в міських населених пунктах під час дії воєнного стану ймовірнісними закономірностями необхідно досліджувати кожний окремий випадок. Ця особливість має бути врахована під час побудови інформаційних систем підтримки прийняття рішень з метою підвищення ефективності реагування аварійно-рятувальних формувань.

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: https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/7

2. Nazarenko S., Kushnareva G., Maslich N., Knaub L., Naumenko N., Kovalenko R., Konkin V., Sukharkova E., Kolienov, O. Establishment of the dependence of the strength indicator of the composite material of pressure hoses on the character of single damages. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Vol. 6. № 1(114). P. 21–27. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.248972

3. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Conceptual approaches for development of informational and analytical expert system for assessing the NPP impact on the environment. Nuclear and Radiation Safety. 2018. № 3(79). P. 56–65. doi: 10.32918/nrs.2018.3(79).09

4. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T., Matvieieva I. Analysis of possible causes of NPP emergencies to minimize risk of their occurrence. Nuclear and Radiation Safety. 2019. № 1(81). P. 75–80. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).13

5. Aldabbas M., Venteicher F., Gerber L., Widmer M. Finding the Adequate Location Scenario After the Merger of Fire Brigades Thanks to Multiple Criteria Decision Analysis Methods. Foundations of Computing and Decision Sciences. 2018. № 43(2). P. 69–88. doi: 10.1515/fcds-2018-0006

6. Usanov D., Guido Legemaate A., 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. Vol. 3. № 3(100). P. 54–62. doi: 10.15587/1729-4061.2019.175110

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

8. Ivanets H., Horielyshev S., Ivanets M., Baulin D., Tolkunov I., Gleizer N., Nakonechnyi A. Development of combined method for predicting the process of the occurrence of emergencies of natural character. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 5. № 10(95). P. 48–55. doi: 10.15587/1729-4061. 2018.143045

9. Ivanov E., Loboichenko V., Artemev S., Vasyukov A. Emergency situations with explosions of ammunition: Patterns of occurrence and progress. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 1. № 10. P. 26–35. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59684

10. 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. Vol. 97. 106730. doi: 10.1016/j.asoc.2020.106730

11. Gorzelanczyk P. Using neural networks to forecast the number of road accidents in Poland taking into account weather conditions. Results in Engineering. 2023. Vol. 17. 100981. doi: 10.20858/sjsutst.2023.118.4

12. Ferreira L., Vega-Oliveros D., Zhao L., Cardoso M., Macau E. Global fire season severity analysis and forecasting. Computers & Geosciences. 2020. Vol. 134. 104339. doi: 10.1016/j.cageo.2019.104339

13. 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

14. 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

15. Chowdhury E., Hassan Q. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. Remote Sens. 2015. № 7(3). P. 2431–2448. doi: 10.3390/rs70302431

16. Spessa A., Field R., Pappenberger F., Langner A., Englhart S., Weber U., Stockdale T., Siegert F., Kaiser J., Moore J. Seasonal forecasting of fire over Kalimantan, Indonesia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2015. Vol. 15. P. 429–442. doi: 10.5194/nhess-15-429-2015

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*
V. Semkiv, *Adjunct*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

STATISTICAL REGULATIONS OF THE OCCURRENCE OF FIRES IN CITIES DURING MARITAL STATE

The process of the occurrence of fires in cities located near the demarcation line during martial law was studied. The subject of the study is statistical regularities that allow us to describe the process of fire occurrence in cities during martial law. Data on fires that occurred in seventeen urban settlements of Ukraine, which are in the immediate vicinity of the demarcation line for the period of 2022, were processed. Statistical hypotheses that allow describing the flow of fires that periodically occurred in cities during the studied period, as well as the time intervals between the moments of their occurrence, have been verified. It has been established that the number of fires that periodically occur on the territory of cities during martial law cannot be described by the Poisson distribution law. Instead, for 59 % of the studied cities, the hypothesis about the geometric law of distribution was confirmed. For some cities in which the number of fires was less than 50 during the period of 2022, it was not possible

to obtain any results. It was established that for 35 % of the total number of analyzed cities, the statistical hypothesis about the possibility of describing the time intervals between the occurrence of fires by the exponential law of distribution was confirmed. A much worse result was obtained when testing the possibility of describing the time intervals between the occurrence of fires by other distribution laws. Therefore, if it is necessary to describe the process of the occurrence of fires in urban settlements during martial law, it is necessary to study each individual case by probabilistic laws. The research results can be used to build information systems to support decision-making by management involved in the elimination of the consequences of dangerous events and emergency situations related to fires.

Keywords: fire, martial law, 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. Nazarenko, S., Kushnareva, G., Maslich, N., Knaub, L., Naumenko, N., Kovalenko, R., Konkin, V., Sukharkova, E., Kolienov, O. (2021). Establishment of the dependence of the strength indicator of the composite material of pressure hoses on the character of single damages. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(1 (114), 21–27. doi: 10.15587/1729-4061.2021.248972

3. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T. (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. Popov, O., Iatsyshyn, A., Kovach, V., Artemchuk, V., Taraduda, D., Sobyna, V., Sokolov, D., Dement, M., Yatsyshyn, T., Matvieieva, I. (2019). Analysis of possible causes of NPP emergencies to minimize risk of their occurrence. Nuclear and Radiation Safety, 1(81), 75–80. doi: 10.32918/nrs.2019.1(81).13

5. Aldabbas, M., Venteicher, F., Gerber, L., Widmer, M. (2018). Finding the Adequate Location Scenario After the Merger of Fire Brigades Thanks to Multiple Criteria Decision Analysis Methods. Foundations of Computing and Decision Sciences, 43(2), 69–88. doi: 10.1515/fcds-2018-0006

6. Usanov, D., Guido Legemaate, A., Peter, M. van de Ven, Rob D. van der Mei. (2019). Fire truck relocation during major incidents. Naval Research Logistics, 66, 2, 105–122. doi: 10.1002/nav.21831

7. 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. Ivanets, H., Horielyshev, S., Ivanets, M., Baulin, D., Tolkunov, I., Gleizer, N., Nakonechnyi, A. (2018). Development of combined method for predicting the process of the occurrence of emergencies of natural character. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5, 10(95), 48–55. doi: 10.15587/1729-4061.2018.143045

9. Ivanov, E., Loboichenko, V., Artemev, S., Vasyukov, A. (2016). Emergency situations with explosions of ammunition: Patterns of occurrence and progress. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1, 10, 26–35. doi: 10.15587/1729-

© Р. І. Коваленко, С. Ю. Назаренко, Е. І. Михлюк, В. О. Семків

4061.2016.59684

10. 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

11. 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

12. Ferreira, L., Vega-Oliveros, D., Zhao, L., Cardoso, M., Macau, E. (2020). Global fire season severity analysis and forecasting. Computers & Geosciences, 134, 104339. doi: 10.1016/j.cageo.2019.104339

13. 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

14. 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

15. Chowdhury, E., Hassan, Q. (2015). Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. Remote Sens, 7(3), 2431–2448. doi: 10.3390/rs70302431

16. Spessa, A., Field, R., Pappenberger, F., Langner, A., Englhart, S., Weber, U., Stockdale, T., Siegert, F., Kaiser, J., Moore, J. (2015). Seasonal forecasting of fire over Kalimantan, Indonesia, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 15, 429–442. doi: 10.5194/nhess-15-429-2015

Надійшла до редколегії: 20.09.2023
Прийнята до друку: 06.11.2023

УДК 351.861

***С. О. Степанчук*[1]**, *викл. каф. (ORCID 0000-0002-6618-4119)*
***В. М. Стрілець*[1]**, *д.т.н., професор, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0001-5992-1195)*
***Є. О. Макаров*[1]**, *PhD, викл. каф. (ORCID 0000-0003-0785-3041)*
***В. В. Стрілець*[2]**, *к.т.н., Supervisor EORE (ORCID 0000-0003-1913-7878)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*International Humanitarian Organization The Halo Trust, Київ, Україна*

ПОРІВНЯЛЬНИЙ КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ В РАДІАЦІЙНО-ЗАБРУДНЕНІЙ МІСЦЕВОСТІ

Здійснено порівняльний аналіз особливостей виконання контрольної типової операції гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості шляхом порівняння часу реалізації способу смикування протитанкової міни, в трьох різних варіантах використання комплексу засобів індивідуального захисту піротехніками Державної служби України з надзвичайних ситуацій за різних умов можливого радіаційного впливу: комбінації захисного костюму Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисного бронешолому ІІІ-А рівня захисту та респіратору типу 3М 6200 ffp3; комбінації захисного костюму Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисного бронешолому ІІІ-А рівня захисту та фільтрувального протигазу типу ГП-5; комбінації захисного костюму Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисного бронешолому ІІІ-А рівня захисту та апарата на стисненому повітрі типу Dräger 7000. Це було викликано тим, що важливою та нерозв'язаною частиною проблеми гуманітарного розмінування, є відсутність кількісних показників, що характеризують особливості оперативної діяльності піротехнічних підрозділів ДСНС в умовах радіаційного забруднення. Унікальність розглянутої ситуації полягає в тому, що тільки в Україні є необхідність такого розмінування. Аналіз отриманих результатів показав, що час виконання типових операцій описується нормальним розподілом незалежно від комбінації засобів індивідуального захисту, які використовуються. При цьому якщо час виконання типових операцій в комплекті захисного спорядження, до якого входить ізолюючий апарат, суттєво відрізняється від їх виконання в комплекті, до якого входить фільтрувальний протигаз, то час виконання в комплекті із респіратором класу ffp3 практично не відрізняється від часу виконання в комплекті із фільтрувальним протигазом.

Ключові слова: гуманітарне розмінування, радіаційне забруднення, сапер, засоби індивідуального захисту, закономірність, розподіл

1. Вступ

Під час виконання завдань з розмінування місцевості саперами піротехнічних відділень (розрахунків) ДСНС може виникнути необхідність в обстеженні території на вибухонебезпечні предмети (ВНП) в радіаційно-забрудненій місцевості. На цей час понад 95 % території зони відчуження Чорнобильської АЕС, в першу чергу в лісній місцевості, заміновано [1]. Мінування цієї території внаслідок збройної агресії військ Російської Федерації є предметом глибокого обговорення через його потенційні наслідки для здоров'я, навколишнього середовища та суспільства. Також це впливає і на соціальні аспекти. Забруднені території обмежують можливості розвитку та використання земель.

Не є виключеним і мінування Запорізької АЕС [2] або застосування російськими окупантами тактичної ядерної зброї [3]. Внаслідок цього, територія України, яка вже є забруднена ВНП та на якій проживає цивільне населення, може бути додатково забрудненою радіоактивними частинками.

Все це свідчить про актуальність проблеми гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення.

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблема гуманітарного розмінування в Україні розглядається багатьма авторами, але вони зосереджуються або на складнощах очистки сільськогосподарських земель [4], або на необхідності застопорити промисловість, в першу чергу будівельну галузь, через те, що українці не можуть попасти в безпечні місця як для проживання, так і для праці, що вимагає відповідної координації зусиль усіх владних структур [5]. При цьому питання гуманітарного розмінування на місцевості, яка має радіаційне забруднення, остались поза увагою, хоча в [6] звертається увага на необхідність застосування нових методів оцінки та відстеження місця знаходження різних типів вибухонебезпечних предметів, а також зниження рівня небезпеки по всій території України (виділена зона відчуження Чорнобильської АЕС), а в [7] підкреслено, що застосування зброї вибухової дії наносить величезні збитки не тільки внаслідок знищення цивільної та промислової інфраструктури, довкілля, але й внаслідок нанесення значної екологічної шкоди. Але конкретних пропозицій в цих випадках не надається. В роботі [8] це зроблено, де, спираючись на [9], показано, що хоча підхід «не нашкодь», як і раніше, добре підходить для пом'якшення прямих наслідків протимінної діяльності, обов'язково необхідно враховувати екологічні особливості території, яка вимагає гуманітарного розмінування, а також в [10], де підкреслена необхідність багатогранної праці за всіма можливими напрямками. Тим більше видно, що в усіх розглянутих роботах питання безпосередньої оперативної діяльності під час гуманітарного розмінування радіоактивно забрудненої місцевості не розглядаються.

В той же час, в [11] на прикладі аналізу проведення аварійно-рятувальних робіт в 2011 році на АЕС «Фукусіма-дайіті» (АЕС) Токійської електроенергетичної компанії показана необхідність визначення закономірностей дій тих рятувальників, які безпосередньо працювали біля та в осередку надзвичайної ситуації. Але отримані результати практично неможливо використовувати для обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості. Як і результати, які були наведені в [12], де основна увага приділяється визначенню закономірностей збору поранених, їх дезактивації, сортування та евакуації під час хімічних, біологічних, радіологічних, ядерних та вибухових подій, або [13], де розглядається вплив пожежно-рятувальних служб на поведінку учасників під час хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних інцидентів. В той же час, дослідження [14], в якому розглядались закономірності щодо оцінки готовності лікарів до хімічних, радіологічних та ядерних інцидентів, показало, що підготовка фахівців, особливо лікарів швидкої допомоги, повинна враховувати специфічні особливості навколишнього середовища надзвичайної ситуації.

Стосовно дій піротехнічних розрахунків ДСНС на сьогоднішній день в загальному випадку застосовується підхід розкриття закономірностей діяльності особового складу, який підтвердив свою ефективність і під час аналізу дій водолазів-саперів [15], і під час знешкодження малогабаритних вибухонебезпечних предметів з використанням спеціалізованих засобів колективного захисту [16]. Проте, не викликає сумнівів, що діяльність саперів піротехнічних відділень (розрахунку) ДСНС (далі – саперів) під час гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості має свої закономірності, які можуть бути пов'язаними як з їх оснащенням засобами противибухового захисту, так й із засобами індивідуального захисту органів дихання та шкіри. Проте, враховуючи унікальність такої си-

туації, яка є притаманною тільки Україні, коли сапер повинен застосовувати як одну [17], так і другу групу засобів індивідуального захисту, раніше в світі не розглядалась, а без знання відповідних кількісних показників, які характеризують цю особливість діяльності особового складу рекомендації будуть носити тільки якісний характер.

Таким чином, важливою та нерозв'язаною частиною проблеми гуманітарного розмінування є відсутність кількісних показників, що характеризують особливості оперативної діяльності саперів піротехнічних відділень (розрахунку) ДСНС в умовах радіаційного забруднення.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є порівняльний аналіз особливостей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення в залежності від захисного спорядження саперів піротехнічних відділень (розрахунку) ДСНС.

Для досягнення поставленої мети потребують вирішення наступні завдання:

1. Визначити статистичні параметри особливостей діяльності саперів в різних засобах захисного спорядження під час гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення.

2. Провести порівняльний аналіз особливостей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення в залежності від захисного спорядження саперів.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – гуманітарне розмінування в умовах радіаційного забруднення.

Предмет дослідження – особливості гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення в залежності від захисного спорядження саперів.

Робоча гіпотеза полягала в тому, що результати порівняння статистичних показників, які характеризують особливості виконання типових операцій гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення саперами піротехнічних відділень ДСНС, дозволять зробити обґрунтований вибір комплексу засобів індивідуального захисту особового складу.

Метод дослідження – експериментальне виконання контрольної типової вправи саперами (зісмикування протитанкової міни ПТМ), що є характерною для гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості, з подальшим порівнянням статистичних характеристик, які отримуються на ПК в середовищі Excel.

Підлягає дослідженню три різні варіанти використання комплексу засобів індивідуального захисту піротехніками піротехнічних розрахунків ДСНС (далі – піротехніками) за різних умов можливого радіаційного впливу:

варіант 1 – комбінація захисного костюма Л-1 (країна виробник – Україна), бронезахисту типу захисний бронежилет IVрівня захисту (країна виробник – Україна), захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту (країна виробник – Україна) та респіратору типу 3М 6200 ffp3 (країна виробник – Україна);

варіант 2 (рис. 1) – комбінація захисного костюма Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та фільтрувального протигазу типу ГП-5 (країна виробник – Україна);

варіант 3 (рис. 2) – комбінація захисного костюма Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та апарата на стисненому повітрі типу Dräger 7000 (країна виробник –Німеччина).

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

Рис. 1. Варіант 2 захисту саперу, який передбачає використання фільтрувального протигазу

Рис. 2. Варіант 3 захисту саперу, який передбачає використання ізолюючого апарату

У якості контрольної вправи було обрано «зісмикування вибухонебезпечного предмету». Її вибір пояснюється тим, що практика розмінування забрудненої вибухонебезпечними предметами місцевості після її звільнення від російських окупантів показала, що, навіть, на мирних територіях вони використовують підступну практику подвійного мінування, коли основна міна додатково мінується міною-ловушкою [18, 19].

В цьому випадку послідовність дій піротехніка має наступний вигляд:

– одягання захисного комплекту;

– у випадку здійснення варіанту 3 виконання оперативної перевірки апарата на стисненому повітрі;

– розгортання лінії з кішкою на відстань 50 м до протитанкової міни ПТМ та зачеплення (рис. 3) її кішкою;

– прямування (50 м) в укриття;

– зісмикування протитанкової міни ПТМ;

– очікування протягом 3 хв. (під час проведення експериментів даний пункт не враховувався);

– прямування до протитанкової міни ПТМ та фіксування результату.

Рис. 3. Зачеплення протитанкової міни

Також треба відмітити, що одягання захисного комплекту піротехнік здійснював за допомогою другої особи, а під час реалізації варіанту 3 апарат на стисненому повітрі одягався після надягання захисних комбінезона та куртки, маски, капюшону, захисних рукавиць та бронежилету, тоді відповідно варіанту 1 фільтруючий респіратор та захисні окуляри або варіанту 2 –фільтруючий протигаз одягався після захисних комбінезонів та куртки. В усіх випадках одягання захисного комплекту закінчувалось одяганням захисної каски з візором.

5. Визначення особливостей діяльності саперів в різних засобах захисного спорядження

Спочатку отримані результати (табл. 1), оскільки у кожному випадку використовувалися вибірки з об'ємом $n = 20 < 30$, були перевірені на нормальність розподілу за критерієм Шапіро-Уілкі [20].

Для цього, наприклад, стосовно до варіанту 1 розмінування, коли операція зісмикування виконується в захисному комплекті із застосуванням респіратору типу 3M 6200 ffp3 (цей варіант розглядається більш докладно тому, що він характеризується найбільшим показником скошеності $Skos_1 = 0{,}21$), спочатку були розраховані середнє значення часу виконання контрольної вправи:

$$\bar{t}_1 = \frac{\sum_{i}^{n} t_{1i}}{n} = 508{,}65 \text{ с}, \qquad (1)$$

де t_{1i} – час зісмикування ПТМ в і-му виконанні операції за варіантом 1, с;

середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left(t_{1i} - \bar{t}_1\right)^2} = 56{,}63 \text{ с}, \qquad (2)$$

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

та

$$n \cdot m_2 = \sum_{i=1}^{n} \left(t_{1i} - \bar{t}_1\right)^2 = 60934{,}55 \text{ с}^2, \quad (3)$$

де m_2 – вибірковий центральний момент другого порядку.

Оскільки оцінки t_i є результатом обробки незалежних спостережень, вони були розташовані в порядку неспадання і позначені символами $t_1, t_2, ..., t_{n=20}$. В табл. 2 приведена впорядкована серія отриманих значень часу виконання вправи за першим варіантом. Це дозволило обчислити проміжну суму S по формулі:

$$S = \sum_{i}^{k} a_{n-i+1} \cdot (t_{(n-i+1)} - t_i) = 243{,}26 \text{ с}, \quad (4)$$

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 (його значення, що наведені в табл. 2, взяті з табл.10 [20]).

Табл. 1. Експериментальні результати [с] виконання контрольної вправи

Спроба	Варіант розмінування		
	1	2	3
1	478	625	520
2	473	546	542
3	563	445	597
4	466	487	614
5	466	523	614
6	448	535	654
7	618	578	405
8	418	457	448
9	546	552	584
10	553	572	799
11	515	458	559
12	604	500	574
13	546	551	555
14	558	567	652
15	445	556	593
16	428	402	592
17	517	516	557
18	534	472	656
19	514	433	440
20	483	498	641
$\bar{t}$	508,65	513,65	579,80
σ	56,63	57,08	87,47
Skos	0,21	-0,15	0,12

У табл. 11 [20] для рівня значимості α=0,05 та n=20 дає значення $W_{табл} = 0{,}905$.

Оскільки

$$W = \frac{S^2}{n \cdot m} = \frac{59174{,}02}{60934{,}55} = 0{,}97 \geq W_{табл} = 0{,}905, \quad (5)$$

розподіл у відповідності до [20] вважається нормальним.

Табл. 2. Упорядкована серія отриманих значень часу розмінування за варіантом 1

k	$t_{(20-k+1)}$, с	t_k, с	$t_{(20-k+1)} - t_k$, с	a_{n-k+1}	$a_{n-k+1} \cdot (t_{(20-k+1)} - t_k)$
1	618,0	418	200,00	0,4493	89,86
2	604,0	428	176,00	0,3098	54,5248
3	563,0	445	118,00	0,2554	30,1372
4	558,0	448	110,00	0,2145	23,595
5	553,0	466	87,00	0,1807	15,7209
6	546,0	466	80,00	0,1512	12,096
7	546,0	473	73,00	0,1245	9,0885
8	534,0	478	56,00	0,0997	5,5832
9	517,0	483	34,00	0,0764	2,5976
10	515,0	514	1,00	0,0539	0,0539
S					243,26
S^2					60934,50

Оскільки

$$W = \frac{S^2}{n \cdot m^2} = \frac{166716}{172753} = 0{,}965 \geq W_{табл} = 0{,}905, \quad (6)$$

розподіл у відповідності до [20] вважається нормальним.

Розрахунки у відповідності до (2–5) були виконані й для інших показників діяльності газодимозахисників, які були обрані для розгляду. В узагальненому вигляді вони наведені в табл. 3.

Розрахунки у відповідності до (2–5) були виконані й для двох інших варіантів виконання контрольної вправи. В узагальненому вигляді вони наведені в табл. 3. Видно, що в усіх випадках розподіли з рівнем значимості α=0,05 можуть вважатись нормальними.

Табл. 3. Узагальнені результати перевірки нормальності розподілів

	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
$\bar{t}$	508,65	513,65	579,80
σ	56,63	57,08	87,47
W	0,965	0,983	0,914
$W_{табл}$	0,905	0,905	0,905

Таким чином, результати статистичного оцінювання експериментальних результатів, які були отримані в процесі здійснення контрольної вправи, яка відображає реальну оперативну діяльність піротехніків під час гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення навколишнього середовища при рівні значимості α=0,05 описуються нормальним розподілом незалежно від комбінації тих засобів індивідуального захисту, в яких вони працюють.

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

6. Порівняльний аналіз особливостей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення

Наявність оцінок математичних очікувань і середньоквадратичних відхилень часу виконання контрольного завдання, яке є типовим під час гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення, в різних варіантах захисного спорядження саперів дозволило виконати перевірку того, наскільки значимо різняться середні значення (рис.4), отримані по незалежних вибірках дослідження, використовуючи t-критерій Стьюдента [21].

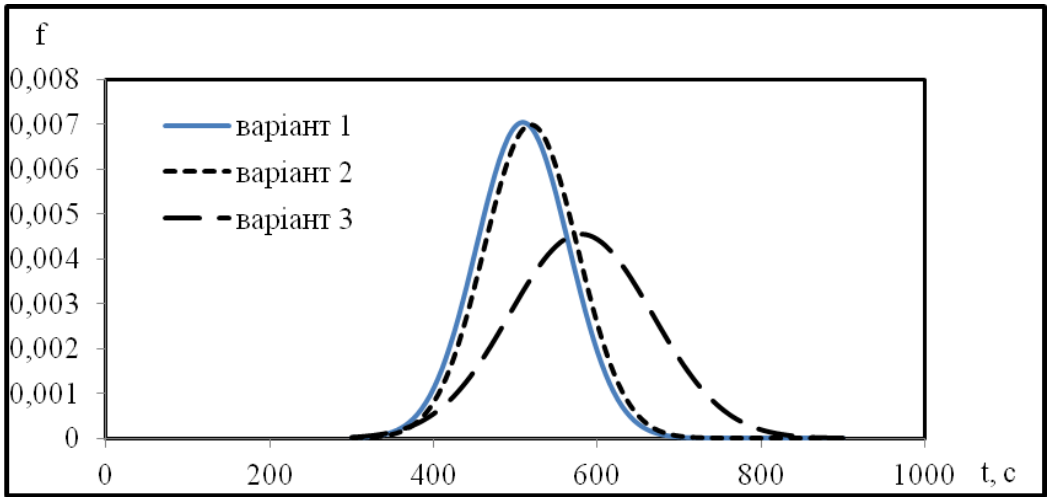


Рис. 4. Розподіли часу виконання контрольної вправи, яка є типовою для процесу гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення, в різних варіантах захисного спорядження

Для цього у випадку, наприклад, для ситуацій, коли порівнюється загальний час виконання контрольної вправи за першим та другим варіантами, розглядалась гіпотеза:

$$H_0 : \bar{t}(1) = \bar{t}(2), \tag{7}$$

та її альтернатива:

$$H_1 : \bar{t}(1) \neq \bar{t}(2), \tag{8}$$

яка доводить відмінність середніх значень.

З метою вибору конкретної методики розрахунку t-критерію [21] спочатку була перевірена гіпотеза про рівність дисперсій. У якості критерію для перевірки нуль-гіпотези:

$$H_0 : \sigma^2(1) = \sigma^2(2) \tag{9}$$

був обраний F-критерій:

$$F = \sigma_1^2 \Big/ \sigma_2^2 = \frac{3258{,}45}{3207{,}08} = 1{,}02, \tag{10}$$

де σ_1^2 – більша з оцінок дисперсій в двох вибірках.

При цьому критичне значення $F_{кр}$, яке при рівні значимості α=0,05 та числі ступенів свободи:

$$\upsilon_1 = n_1 - 1 = 19,\ \upsilon_2 = n_2 - 1 = 19, \tag{11}$$

де $n_1 = n_2 = 20$ – кількість вправ, які виконувались під час проведення експериментів за першим та другим варіантами виконання контрольного завдання, дорівнює [22]

$$F_{кр} = F_{табл} = 2{,}15. \tag{12}$$

Видно, що в розглянутому випадку правомірною визнається нуль-гіпотеза (9) та допускається рівність дисперсій часу виконання контрольної справи за першим та другим варіантом.

Розрахунки у відповідності до (9–12) були виконані й для порівняння дисперсій за другим та третім варіантами. В узагальненому вигляді результати оцінювання критерію Фішера наведені в табл. 4. Її аналіз показує, що для розрахунку критерію Стьюдента необхідно використовувати різні методики [21]. Це викликано тим, що у випадку порівняння дисперсій розподілу часу виконання контрольної вправи за другим та третім варіантами,

$$F(2-3) = 2{,}35 > F_{кр} = 2{,}15, \tag{13}$$

що свідчить про те, що з рівнем значимості α=0,05 можна стверджувати про те, що ці дисперсії розрізняються суттєво.

Табл. 4. Узагальнені результати порівняння дисперсій

	F(1–2)	F(2–3)
	1,02	2,35
$F_{кр}$	2,15	
Висновок	$\sigma^2(1) \approx \sigma^2(2)$	$\sigma^2(2) < \sigma^2(3)$

Виходячи з табл. 4 під час порівняння математичних очікувань виконання контрольної вправи за варіантами 1 та 2 стандартна помилка різниці S_{1-2}, з урахуванням того, що вибірки малого розміру (<30), та число ступенів свободи υ при обчисленні t-критерію розраховуються [21] наступним чином:

$$S_{1-2} = \sqrt{\frac{(n_1-1)\cdot\sigma_1^2 + (n_2-1)\cdot\sigma_2^2}{n_1+n_2-2}\cdot\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)} = \tag{14}$$

$$= \sqrt{\frac{(20-1)\cdot 3207{,}08 + (20-1)\cdot 3258{,}45}{20+20-2}\cdot\left(\frac{1}{20}+\frac{1}{20}\right)} = 17{,}98;$$

$$\upsilon = n_л(п) + n_л(к) - 2 = 38. \tag{15}$$

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

В результаті:

$$t_{набл} = \frac{|\bar{t}(1) - \bar{t}(2)|}{S_{1-2}} = \frac{|508{,}65 - 513{,}65|}{17{,}98} = 0{,}28. \quad (16)$$

Оскільки

$$t_{набл} = 0{,}28 < t_{табл}(\alpha = 0{,}05) = 2{,}15, \quad (17)$$

можна говорити, що при рівні значимості α=0,05 результати часу виконання першої та другої контрольної вправ відрізняються несуттєво.

Для порівнювання середніх значень виконання другої та третьої контрольних вправ стандартна помилка різниці S_{2-3} і число ступенів свободи υ при обчисленні t-критерію були розраховані наступним чином:

$$S_{2-3} = \sqrt{\frac{\sigma_2^2}{n_2} + \frac{\sigma_3^2}{n_3}} = 23{,}36, \quad (18)$$

$$\upsilon = \frac{\left(\frac{\sigma_2^2}{n_2} + \frac{\sigma_3^2}{n_3}\right)^2}{\frac{\sigma_2^4}{n_2^2 \cdot (n_2 - 1)} + \frac{\sigma_3^4}{n_3^2 \cdot (n_3 - 1)}} = 32{,}70. \quad (19)$$

В результаті:

$$t_{набл} = \frac{|\bar{t}_2 - \bar{t}_3|}{S_{2-3}} = \frac{|513{,}65 - 579{,}80|}{23{,}36} = 2{,}83 > t_{табл}(\alpha = 0{,}05) = 2{,}04, \quad (20)$$

тобто, значення t-критерію $t_{набл}$ більше критичного значення t-критерію $t_{табл}$ при заданому рівні значимості α=0,05 і числі ступенів свободи υ. Це говорить про те, що на рівні значимості α (ймовірність похибки менше 5 %) можна прийняти гіпотезу H_0. Отже, відмінність математичних очікувань часу виконання контрольної вправи між другим та третім варіантами є значимою.

Таким чином, порівняльний аналіз закономірностей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення в залежності від захисного спорядження саперів показав, що, якщо час виконання типових операцій в комплекті захисного спорядження, до якого входить апарат на стисненому повітрі, суттєво (із рівнем значимості α=0,05) відрізняється від їх виконання в комплекті, до якого входить фільтрувальний протигаз, то час виконання в комплекті із респіратором класу ffp3 практично не відрізняється (на рівні значимості α=0,05) від часу виконання в комплекті із фільтрувальним протигазом.

7. Обговорення результатів визначення особливостей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення

Внаслідок мінування російськими окупантами більшості зони відчуження Чорнобильської АЕС, можливого мінування Запорізької АЕС або застосування

ними тактичної ядерної зброї, в Україні має місце унікальна ситуація, яка ніколи і ніде в світі не розглядалась, необхідність гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення. Підвищення ефективності цього процесу вимагає знання кількісних показників, що характеризують особливості діяльності саперів в комплексі індивідуального захисту, який одночасно включає і засоби бронезахисту і засоби захисту органів дихання та шкіри.

Результати статистичного оцінювання отриманих експериментальних результатів дозволяють стверджувати, що з рівнем значимості α=0,05 особливістю виконання типових вправ саперами під час гуманітарного розмінування в радіаційно-забрудненій місцевості є нормальний розподіл часу їх виконання незалежно від комбінації тих засобів індивідуального захисту, в яких вони працюють. Це пояснюється тим, що кожна вправа вимагає послідовного виконання різноманітних операцій. І незалежно від розподілу часу їх виконання у відповідності до центральної граничної теореми [23] закон розподілу типової вправи повинен бути нормальним.

З урахуванням того, що аналогічні дослідження стосовно визначення особливостей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення ніде і ніколи не проводились, вперше було визначено статистичні характеристики розподілів часу виконання типової вправи («зісмикування протитанкової міни ПТМ»). Результати порівняльного аналізу отриманих показників дозволяють стверджувати, що якщо час виконання типових операцій в комплекті захисного спорядження, до якого входить ізолюючий апарат захисту органів дихання, суттєво (із рівнем значимості α=0,05) відрізняється від їх виконання в комплекті, до якого входить фільтрувальний протигаз, то час виконання в комплекті із респіратором класу ffp3 практично не відрізняється (на рівні значимості α=0,05) від часу виконання в комплекті із фільтрувальним протигазом.

Сильною стороною отриманих результатів є визначення достовірних показників (з рівнем значимості α=0,05), які можуть бути основою для обґрунтування конкретних пропозицій щодо організації робіт з гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення, вибору засобів індивідуального захисту, обґрунтування тактико-технічних вимог до них як на етапі створення, так і на етапі придбання, визначення особливостей підготовки саперів. Так, видно, що не має сенсу займатись подальшими дослідженнями особливостей відповідної діяльності саперів в респіраторах класу ffp3, оскільки кожний з них має індивідуально закріплений фільтрувальний. З урахуванням виконання більшості робіт з гуманітарного розмінування в умовах радіаційного впливу на відкритій місцевості, основну увагу під час подальших досліджень доцільно приділити визначенню оперативно-технічних рекомендацій щодо підвищення ефективності відповідної оперативної діяльності в комплексах індивідуального захисту сапера, до складу яких входять фільтрувальні протигази.

Одночасно необхідно відмітити, що застосування обраного підходу в практичній діяльності супроводжується трудомісткістю проведення експериментальних досліджень, результати яких є основою для науково-обґрунтованих рішень щодо підвищення ефективності дій особового складу піротехнічних підрозділів ДСНС в радіаційно-забрудненій місцевості, оскільки для здійснення цього процесу необхідно залучити висококваліфікованих спеціалістів, які одночасно мають знання та навички як в практиці розмінування та іншої оперативної діяльності в умовах радіаційного забруднення, так і в організації експериментальних досліджень таким чином, щоб були отримані статистично значимі результати, на яких будуть ґрунтуватись відповідні практичні рекомендації. В перспективі цей недолік може бути усунений шляхом коригування вже отриманих статистичних показників у від-

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

повідності до нових вихідних даних, що пов'язані зі зміною складових комплексу засобів індивідуального захисту, рівня підготовленості саперів, умов надзвичайної ситуації із застосуванням, наприклад, методу безпосередніх експертних оцінок.

Розвиток даного дослідження полягає в тому, що визначення особливостей кількісних показників, які характеризують виконання типових операцій гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення з рівнем значимості α=0,05, дозволяє використовувати їх у якості вихідних даних для імітаційних моделей попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з розташуванням вибухонебезпечних предметів в радіаційно-забрудненій місцевості. Труднощами, з якими можна зіткнутися в подальшому в цьому випадку, буде отримання відповідних вихідних даних щодо нових операцій, статистичні характеристики яких потрібно отримати для здійснення імітаційного моделювання різноманітних варіантів здійснення процесу гуманітарного розмінування.

8. Висновки

1. Результати статистичного оцінювання експериментальних результатів, які були отримані в процесі здійснення контрольної вправи («зісмикування протитанкової міни ПТМ» із застосуванням трьох різних можливих варіантів використання комплекту засобів індивідуального захисту піротехніками піротехнічних розрахунків ДСНС за різних умов можливого радіаційного впливу), яка відображає реальну оперативну діяльність саперів під час гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення навколишнього середовища при рівні значимості α=0,05 описуються нормальним розподілом незалежно від комбінації тих засобів індивідуального захисту (захисного костюму Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та засобу індивідуального захисту органів дихання), в яких вони працюють, з відповідними параметрами, які міняються в залежності від засобу індивідуального захисту органів дихання: у разі використання респіратору типу 3M 6200 ffp3 математичне очікування часу виконання операції $\bar{t}_1$=508,65 с, середньоквадратичне відхилення σ_1=56,63 с; фільтрувального протигазу типу ГП-5– $\bar{t}_2$ =513,65 с, σ_2=57,08 с; апарата на стисненому повітрі типу Dräger 7000– $\bar{t}_3$ =579,80 с, σ_3=87,47 с.

2. Порівняльний аналіз закономірностей гуманітарного розмінування в умовах радіаційного забруднення в залежності від захисного спорядження саперів показав, якщо час виконання типових операцій в комплекті захисного спорядження, до якого входить апарат на стисненому повітрі (комбінація захисного костюма Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та апарата на стисненому повітрі типу Dräger 7000), суттєво (із рівнем значимості α=0,05) відрізняється від їх виконання в комплекті, до якого входить фільтрувальний протигаз (комбінація захисного костюма Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та фільтрувального протигазу типу ГП-5), то час виконання в комплекті із респіратором класу ffp3 (комбінація захисного костюма Л-1, бронезахисту типу захисний бронежилет IV рівня захисту, захисний бронешолом ІІІ-А рівня захисту та респіратору типу 3M 6200 ffp3) практично не відрізняється (на рівні значимості α=0,05) від часу виконання в комплекті із фільтрувальним протигазом. З урахуванням цього дослідженнями особливостей відповідної діяльності саперів в респіраторах класу ffp3 займатись не має сенсу. Основну увагу під

час подальших досліджень доцільно приділити обґрунтуванню оперативно-технічних рекомендацій щодо діяльності саперів в комплексах індивідуального захисту сапера, до складу яких входять фільтрувальні протигази.

Література

1. Ukrinform. Понад 95 % території зони відчуження ЧАЕС може бути замінновано. Укрінформ - актуальні новини України та світу. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3701184-ponad-95-teritorii-zoni-vidcuzenna-caes-moze-buti-zaminovano.html

2. Хотин Р. Перестрахуватись від «другого Чорнобиля» та «мавп із гранатами». Що треба знати про «теракт» на Запорізькій АЕС?. Радіо Свобода. URL: https://www.radiosvoboda.org/a/ukrayina-zaporizka-aes-rosiya-yadernyy-terakt-shcho-treba-znaty/32472691.html

3. Гудкова С. Загроза застосування тактичної ядерної зброї: чи зважиться Путін на удар. RFI. URL: https://goo.su/Matc

4. Schindler M., Connell A. «Mine Action and Food Security: The Complexities of Clearing Ukraine's Agricultural Lands». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2023. Vol. 27. Iss. 2. Article 3. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/3

5. Crowther G. «Ukraine: Coordinating the Reponse». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2022. Vol. 25. Iss. 3. Article 3. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss3/3

6. Mathewson A. «Open-Source Research and Mapping of Explosive Ordnance Contamination in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2022. Vol. 26. Iss. 1. Article 3. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol26/iss1/3

7. Cottrell L., Darbyshire E., Holme Obrestad K. «Explosive Weapons Use and the Environmental Consequences: Mapping Environmental Incidents in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2022. Vol. 26. Iss. 1. Article 4. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol26/iss1/4

8. Chrystie E. «Environmental Mainstreaming in Mine Action: A Case Study of Moving Beyond «Do № Harm». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2022. Vol. 27. Iss. 2. Article 5. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/5

9. n/a, Anonymous. «Developing National Landmine Clearance Capacity in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction. 2021. Vol. 25. Iss. 1. Article 9. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss1/9

10. Mori K. Occupational health in disasters: Valuable knowledge gained from experience with the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Journal of Occupational Health. 2019. Т. 61. № 6. С. 429–430. doi: 10.1002/1348-9585.12084

11. Hignett S., Hancox G., Edmunds O. M. «Chemical, biological, radiological, nuclear and explosive (CBRNe) events: Systematic literature review of evacuation, triage and decontamination for vulnerable people». International Journal of Emergency Services. 2019. Vol. 8. № 2. P. 175–190. doi: 10.1108/IJES-05-2018-0030

12. Long F., Bateman G., Majumdar A. «The impact of fire and rescue service first responders on participant behaviour during chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN)/Hazmat incidents». International Journal of Emergency Services. 2020. Vol. 9. № 3. P. 283–298. doi: 10.1108/IJES-06-2019-0027

13. Long F. Bateman G., Majumdar A. «The impact of fire and rescue service first responders on participant behaviour during chemical, biological, radiological and

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

nuclear (CBRN)/Hazmat incidents». International Journal of Emergency Services. 2020. Vol. 9. № 3. P. 283–298. doi: 10.1108/IJES-06-2019-0027

14. Gyllencreutz L., Carlsson C.-P., Karlsson S. and Hedberg P. «Preparedness for chemical, radiologic and nuclear incidents among a sample of emergency physicians' and general practitioners'—a qualitative study». International Journal of Emergency Services. 2023. Vol. 12. № 2. P. 161–170. doi: 10.1108/IJES-07-2022-0032

15. Соловйов І. І., Стецюк Є. І., Стрілець В.М. Закономірності розходу повітря під час підводного розмінування водних акваторій. Збірка наукових праць «Проблеми надзвичайних ситуацій». Харків: НУЦЗ України, 2020. Вип. 2(32). С. 132–144. doi: 10.5281/zenodo.4400181

16. Lyovin D., Strelets V., Shevchenko R., Loboichenko V., Divizinyuk M., StreletsV. and Pruskyi A. «A dataset on the features of the elimination of explosive objects using a dome-shaped protective device with a load». Data in Brief. Vol. 50. October 2023. 109602. doi: 10.1016/j.dib.2023.109602

17. Про затвердження Правил радіаційної безпеки при проведенні робіт у зоні відчуження і зоні безумовного (обов'язкового) відселення: наказ Міністерство охорони здоров'я України, Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 04.04.2008 № 179/276: станом на 12 вересня 2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0754-08#Text

18. Рашисти почали робити вкрай небезпечні міни-пастки: чого не треба робити за будь-яких умов | Defense Express. Військовий портал Defense Express - все про військову справу. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/vorog_pochav_robiti_vkraj_nebezpechni_mini_pastki_chogo_ne_treba_robiti_za_bud_jakih_umov-6660.html

19. Войтюк Т. Російські військові залишають міни-пастки – ДСНС. Суспільне. Новини. URL: https://suspilne.media/360296-rosijski-vijskovi-zalisaut-mini-pastki-dsns/

20. ДСТУ ISO 5479:2009. Статистичне опрацювання даних. Критерії відхилення від нормального розподілу (ISO 5479:1997, IDT). Чинний від 01.07.2011. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2009. 34 с.

21. Митропольский А. К. Техника статистических вычислений – Главная редакция физ.-мат. литературы издательства «Наука», 1971. 576 с.

22. Халафян А. А. STATISTICA: Статистический анализ данных. 000 «Бином-Пресс», 2007. 512 с.

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

***S. Stepanchuk*[1]**, *Senior Lecture of the Department*
***V. Strelets*[1]**, *DSc, Professor, Senior Lecture of the Department*
***Y. Makarov*[1]**, *PhD, Lecturer of the Department*
***V. Strelets*[2]**, *PhD, Supervisor EORE*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*International Humanitarian Organization The Halo Trust, Kyiv, Ukraine*

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE REGULATIONS OF HUMANITARIAN DEMINING IN A RADIATION-CONTAMINATED AREA

A comparative analysis of the regularities of the implementation of a control typical operation of humanitarian demining in a radiation-contaminated area was carried out by comparing the time of implementation of the method of jerking an anti-tank mine, which is located at a distance of 50 meters from the shelter, where the sapper is located during the execution of the most dangerous stage, in three different options for the use of a complex of means individual protection by sappers of the State Emergency Service of Ukraine under various conditions of possible radiation exposure: a combination of a

protective suit L-1, armor protection of the type of protective body armor of the IV level of protection, a protective armor helmet of the level of protection III-A, and a respirator of the type ZM 6200 ffp3; a combination of L-1 protective suit, armor protection of the IV level of protection type protective body armor, III-A level of protection armor helmet, and GP-5 type filter gas mask; a combination of L-1 protective suit, armor protection type IV protective vest, III-A protective helmet, and compressed air apparatus Dräger 7000. This was caused by the fact that an important and unsolved part of the problem of humanitarian demining is the lack of regularities in the operational activity of sappers of the State Emergency Service in conditions of radiation contamination. The uniqueness of the considered situation is that only in Ukraine there is a need for humanitarian demining of radiation-contaminated area. The analysis of the obtained regularities showed that the time of execution of typical operations of the considered process is described by a normal distribution regardless of the combination of personal protective equipment in which sappers work. At the same time, if the time of performing typical operations in a set of protective equipment, which includes an isolating device, differs significantly from their performance in a set that includes a filtering gas mask, then the time of performing it in a set with a respirator of class ffp3 is practically no different from the time of performing it in a set with filter gas mask.

Keywords: humanitarian demining, radiation contamination, sapper, personal protective equipment, regularity, distribution

References

1. Ukrinform. (2023). More than 95 % of the territory of the exclusion zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant can be replaced. Ukrinform - current news of Ukraine and the world. Available at: https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3701184-ponad-95-teritorii-zoni-vidcuzenna-caes-moze-buti-zaminovano.html

2. Khotyn, R. (2023). Insure yourself against the «second Chernobyl» and «monkeys with grenades». What should be known about the «terrorist attack» at the Zaporizhzhia NPP?. Radio Svoboda. Available at: https://www.radiosvoboda.org/a/ukrayina-zaporizka-aes-rosiya-yadernyy-terakt-shcho-treba-znaty/32472691.html

3. Gudkova, S. (2023). The threat of using tactical nuclear weapons: will Putin decide to strike.RFI. Available at: https://goo.su/Matc

4. Schindler, M., Connell, A. (2023). «Mine Action and Food Security: The Complexities of Clearing Ukraine's Agricultural Lands». The Journal of Conventional Weapons Destruction, 27, 2, 3. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/3

5. Crowther, G. (2022). Quot; Ukraine: Coordinating the Reponse, & quot. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 25, 3, 3. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss3/3

6. Mathewson, A. (2022). «Open-Source Research and Mapping of Explosive Ordnance Contamination in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction, 26, 1, 3. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol26/iss1/3

7. Cottrell, L., Darbyshire, E., Holme, O. K. (2022). «Explosive Weapons Use and the Environmental Consequences: Mapping Environmental Incidents in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction, 26, 1, 4. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol26/iss1/4

8. Chrystie, E. (2023). «Environmental Mainstreaming in Mine Action: A Case Study of Moving Beyond «Do No Harm». The Journal of Conventional Weapons Destruction, 27, 2, 5. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/5

9. n/a, Anonymous. (2021). «Developing National Landmine Clearance Capacity in Ukraine». The Journal of Conventional Weapons Destruction, 25, 1, 9. Available at: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol25/iss1/9

10. Koji, Mori. 2019. «Occupational health in disasters: Valuable knowledge gained from experience with the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident».

© С. О. Степанчук, В. М. Стрілець, Є. О. Макаров, В. В. Стрілець

Journal of Occupational Health, 61, 6, 429–430. doi: 10.1002/1348-9585.12084

11. Hignett, S., Hancox, G., Edmunds, Otter, M. (2019). «Chemical, biological, radiological, nuclear and explosive (CBRNe) events: Systematic literature review of evacuation, triage and decontamination for vulnerable people». International Journal of Emergency Services, 8, 2, 175–190. doi: 10.1108/IJES-05-2018-0030

12. Long, F., Bateman, G., Majumdar, A. (2020). «The impact of fire and rescue service first responders on participant behaviour during chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN)/Hazmat incidents». International Journal of Emergency Services, 9, 3, 283–298. doi: 10.1108/IJES-06-2019-0027

13. Long, F., Bateman, G., Majumdar, A. (2020). «The impact of fire and rescue service first responders on participant behaviour during chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN)/Hazmat incidents». International Journal of Emergency Services, 9, 3, P. 283–298. doi: 10.1108/IJES-06-2019-0027

14. Gyllencreutz, L., Carlsson, C.-P., Karlsson, S., Hedberg, P. (2023). «Preparedness for chemical, radiologic and nuclear incidents among a sample of emergency physicians' and general practitioners'—a qualitative study». International Journal of Emergency Services, 12, 2, 161–170. doi: 10.1108/IJES-07-2022-0032

15. Solovyov, I. I., Stetsyuk, E. I., Strelets, V. M. (2020). «Patterns of air consumption during underwater demining of water areas». Problems of emergency situations, 132–144. doi: 10.5281/zenodo.4400181

16. Lyovin, D., Strelets, V., Shevchenko, R., Loboichenko V., Divizinyuk, M., Strelets,V., Pruskyi, A. (2023). «A dataset on the features of the elimination of explosive objects using a dome-shaped protective device with a load», Data in Brief, 50, 109602. doi: 10.1016/j.dib.2023.109602

17. Law of Ukraine. (2008). «On the approval of the Radiation Safety Rules when carrying out work in the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement», 179/276. Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0754-08#Text

18. Tuka, G. (2022) Trap mine or surprise mine - simple rules that save lives. Defense Express Available at: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/vorog_pochav_robiti_vkraj_nebezpechni_mini_pastki_chogo_ne_treba_robiti_za_bud_jakih_umov-6660.html

19. Voytiuk, T. (2023). The Russian military leaves landmines - DSNS. Public. Available at: https://suspilne.media/360296-rosijski-vijskovi-zalisaut-mini-pastki-dsns/

20. Statystychne opratsiuvannia danykh. Katehorii vidkhylennia vid normalnoho rozpodilu [Statistical interpretation of data – Tests for departure from the normal distribution]. (2009). DSTU ISO 5479:2009(ISO 5479:1997, IDT) from 1st Jule 2011. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy, 34.

21. Mitropol'skij, A. (1971). Tekhnika statystychnykh obchyslen [The technique of statistical calculations]. Nauka, 576.

22. Khalafyan, A. (2007). STATISTICA 6 Statystychnyi analiz danykh. Binom-Press, 512.

23. Venttsel, E. (1962). Teoriya veroyatnostey [Probability theory]. Nauka, 564.

Надійшла до редколегії: 25.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

УДК 614.84

Л. М. Куценко, *д.т.н., професор, проф. каф. (ORCID 0000-0003-1554-8848)*
О. І. Сухарькова, *викл. каф. (ORCID 0000-0003-1033-4728)*
Д. І. Савельєв, *к.т.н., ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-4310-0437)*
В. Б. Коханенко, *к.т.н., доцент, викл. каф. (ORCID 0000-0001-5555-5239)*
М. М. Журавський, *к.т.н., доцент, заст. нач. центру – нач. відділу (ORCID 0000-0001-8356-8600)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИБУХОВИХ ХВИЛЬ, ВІДБИТИХ ВІД ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ СИНУСОЇДАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ

Пропонується спосіб геометричного моделювання сім'ї фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю. За основу прийнято модель «оптичного» відбиття, коли для кожного падаючого віртуального вибухового «променя» кут відбиття дорівнює куту падіння. Для ілюстрації графоаналітичного підходу розроблено тестову модель формоутворення сім'ї фронтів відбитих хвиль для циліндричної параболічної поверхні. Розглянуто циліндричну поверхню синусоїдального профілю, одержану шляхом згинання подовжніми силами металевого листа прямокутної форми. Описано геометричні моделі сім'ї фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю. Складено maple – програму унаочнення моделей сім'ї фронтів вибухових хвиль. Проведені дослідження синусоїдальних циліндричних відбивачів призначені для демонстрації ефекту примноження дії ударних вибухових хвиль, спрямованих до зони пожежі. Для їх практичного використання необхідно знайти параметри згинання циліндра такі, щоб віртуальні промені «точкової» вибухової речовини трансформувалися в систему променів, близьких до паралельних у зоні пожежі. В результаті досліджень було розраховано параметри згинання прямокутного листа подовжніми силами, а також визначено координати місця розташування «точкової» вибухової речовини. При цьому враховано, що циліндричні відбивачі з синусоїдальним профілем можливо виготовляти на місці їх використання. Для цього прямокутний лист метала слід зігнути подовжніми силами (на відстань, визначену у роботі) і зафіксувати згин за допомогою зварювання прутами арматури. Проведені дослідження спрямовані на розвиток технології гасіння лісових пожеж направленими вибухами.

Ключові слова: вибухова хвиля, циліндрична поверхня, відбивач, синусоїдальний профіль, фронт відбитої хвилі

1. Вступ

Серед сучасних технологій гасіння лісових пожеж перспективним вважається спосіб, оснований на використанні спрямованих вибухів. При цьому на лісову пожежу направляється подвійний вплив як безпосередньо від ударної хвилі вибуху, так і від хвилі вибуху, відбитої від спеціального відбивача.

Гасіння лісових пожеж за допомогою спрямованих вибухів – одна з актуальних тем наукових досліджень [1]. Припинення горіння відбувається за рахунок відкидання полум'я від горючих матеріалів вибуховою хвилею. Це руйнує структуру полум'я й запобігає його підтримці за рахунок окислення палива, після чого горіння припиняється. Для практики гасіння лісових пожеж необхідні дешеві та мобільні відбивачі, які в умовах бездоріжжя будуть зручними для транспортування до місць їхнього використання. Увагу привертають відбивачі, які можна виготовити (змонтувати) безпосередньо на місці їхнього використання. Мова йде про відбивачі з циліндричними поверхнями, які утворені шляхом пружного згинання металевого листа прямокутної форми [2, 3]. В роботі [4] показано, що коли металевий лист прямокутної форми незначно зігнути подовжніми силами, то має утворитися циліндрична поверхня синусоїдального профілю.

На рис. 1 зображено можливу практичну схему конструкції відбивача, де обрано такі позначення: 1 – зігнутий металевий лист, 2 – вибухівка, 3 – арматурні прути.

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

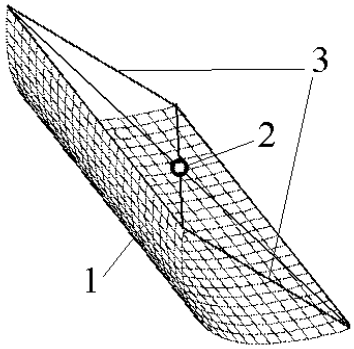


Рис. 1. Схема конструкції циліндричного відбивача

Таким чином, розвиток технології гасіння пожеж спрямованими вибухами з використанням відбивачів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [6] досліджено взаємодію вибухової хвилі з різноманітними об'єктами. Помічено, що круглий диск послаблює вибухову хвилю ефективніше, ніж конус і сфера для тієї ж фронтальної області. Загасання було найменшим у сфері, а максимальним у круговому диску. Але в роботі відсутні дані про створення геометричної моделі для пояснення виявленого ефекту. В роботі [7] досліджено результати вибухів, що вражають структуру будівель у вигляді хвиль, і які є комбінацією надлишкового тиску та імпульсу або тривалості. Це призводить до великих внутрішніх і зовнішніх пошкоджень, а також знижує міцність конструкції. Вивчається необхідність розробити конструкції для опору вибуховим навантаженням. Але в роботі не надана геометрична модель комбінації надлишкового тиску та імпульсу.

В роботі [8] розглянуто питання інженерних впроваджень описів очікуваних вибухових хвиль як вирішальних етапів загального процесу проектування. Однак у порівнянні з ідеальними теоретичними формулюваннями реальні вибухові події можуть бути дуже чутливими до безлічі параметрів і, перш за все, до основних характеристик (розміру, типу, форми тощо) заряду. Обговорюються зібрані пікові значення надлишкового тиску для вибраних зарядів вибухових речовин. Але в роботі не систематизовано характеристики заряду для розробки програмного забезпечення. В роботі [9] за допомогою датчиків тиску та високошвидкісної камери виконано аналіз взаємодії ударної хвилі з перешкодою простої геометрії. Метою дослідження було продемонструвати можливості різних методів для аналізу явищ, пов'язаних з взаємодією тривимірних розмірів ударної хвилі з об'єктом. Також слід було б виконати геометричне моделювання явищ. В роботі [10] чисельним методом було візуалізовано та досліджено складні явища поширення та взаємодії вибухових хвиль при ударах по перешкодах. Перехідні ударні явища моделювали за допомогою багатоблочної сіткової системи та обчислювальної моделі потоку. Але в роботі не наведено геометричне моделювання явища поширення та взаємодії вибухових хвиль при ударах по перешкодах.

Проведений мета-аналіз вказує на відсутність результатів стосовно унаочнення фронтів відбитих хвиль. Крім того, у явному вигляді відсутні графічні ілюстрації оцінки їх енергетичних параметрів. Це затрудняє створення програмного забезпечення для реалізації на практиці ідеї гасіння пожеж спрямованими вибухами.

Таким чином, не вирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність моделей фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є розробка способу геометричного моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

– розробити геометричну модель фронту відбитої хвилі для циліндричної поверхні з тестовим профілем параболи;

– описати циліндричну поверхню синусоїдального профілю, одержану шляхом вигинання подовжніми силами металевого листа прямокутної форми;

– змоделювати фронти вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю.

4. Матеріали та методи дослідження

Об’єктом проведених досліджень є розвиток технології гасіння лісних пожеж за допомогою спрямованих вибухових хвиль. При цьому вважається, що на пожежу направляється подвійний вплив як безпосередньо від ударної хвилі вибуху, так і від хвилі вибуху, відбитої від спеціального відбивача. Ефективність такої технології пожежогасіння залежить від конструкції відбивача. В роботі для формування направлених хвиль вибуху пропонується використовувати циліндричні відбивачі з синусоїдальним профілем, які можна виготовити (змонтувати) на місці їх використання.

Предметом досліджень є розробка способу моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю. Задача полягає у виборі конструктивних параметрів зазначеного циліндричного відбивача для його функціонування. Результат «класичної» механіки [4] обґрунтовує утворення циліндричної поверхні синусоїдального профілю шляхом згинання металевого листа прямокутної форми незначними подовжніми силами. В даній роботі ці результати доповнено завдяки залученню моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від зазначеної поверхні. Також розраховані степінь згинання листа та місця розташування вибухової речовини.

Гіпотеза досліджень пов’язана з унаочненням відбитої вибухової хвилі. В даній роботі за основу прийнято «оптичний» закон відбиття. Вважається, що для кожного віртуального падаючого «вибухового» променя кут відбиття дорівнює куту падіння, а напрямки падіння, нормалі і відбиття, є компланарними. Фронт відбитої хвилі складають точки, для яких постійною є сума відстаней від вибухової речовини до точки відбиття, а також від точки відбиття до шуканої точки фронту хвилі.

Обрана модель досліджень буде певним кроком до розрахунку реальних вибухів, які формують ударну хвилю. Для пояснення проаналізуємо [5] приклад повітряного вибуху на малій висоті, коли сім’я фронтів падаючої вибухової хвилі поширюється від центру вибуху. При контакті з землею ця хвиля відбивається від поверхні землі, створюючи сім’ю фронтів відбитої хвилі. Остання одержує високу температуру і тиск, а також має більшу швидкість ніж падаюча вибухова хвиля. Коли фронт відбитої вибухової хвилі наздоганяє відповідний йому фронт початко-

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

вої вибухової хвилі, то їх комбінація тисків формує фронт могутнішої вибухової хвилі, яка має назву головної вибухової хвилі. Найвища точка фронту головної хвилі і передня кромка точки зустрічі фронтів обох хвиль (падаючої і відбитої) називається потрійною точкою. В області цієї точки утворюється піковий тиск, який у кілька разів більший, ніж піковий тиск фронту падаючої вибухової хвилі.

Але такі технології гасіння лісових пожеж доцільно використовувати за умови застосування зарядів, складених з суміші вибухонебезпечних газів [1]. Тоді процес необхідно конструктивно організувати так, щоб підрив заряду умовно «розтягнувся» у часі. В результаті чого зменшиться (руйнівний) вплив головної вибухової хвилі, і потрійна точка фронтів належатиме переважно падаючій та відбитій хвилям. Така схема буде близькою до розрахунку відбивальної системи з оптичним законом відбиття.

5. Розробка геометричної моделі фронту відбитої хвилі для циліндричної параболічної поверхні

Фронтом хвилі від точкового джерела променів S називається лінія Ф, для всіх точок Q якої однаковим є шлях, що зроблено променем, який надійшов з точки S до точки Q після відбиття від кривої L в точці M (для довільної точки $M \in L$). Аналогічне визначення маємо і в просторовому випадку.

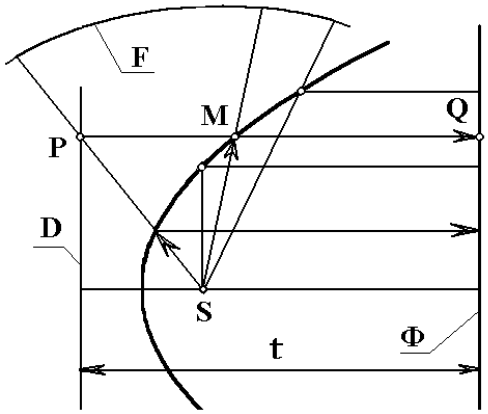


Рис. 2. Фронт хвилі, який сформовано в результаті відбиття від параболи

Парабола (а в просторовому випадку – параболічний циліндр або параболоїд обертання) являє собою нібито «геометричний трансформатор», який перетворює сферичну форму фронту вибухової хвилі в плоску форму.

Розглянемо циліндричну відбивальну поверхню L, профіль якої в декартовій системі координат Oxyz описано рівнянням z=f(x). Джерело променів нехай має координати $S(x_0, y_0, z_0)$. Алгоритм побудови променя, який відбито циліндричною поверхнею, базується на такому твердженні.

Твердження 1. Точки $S(x_0, y_0, z_0)$ і $M(x_2, y_2, z_2)$ розташовані симетрично відносно прямої L: $\frac{x - x_1}{m} = \frac{y - y_1}{n} = \frac{z - z_1}{l}$ тоді, коли будуть виконуватися співвідношення.

$$x_2 = 2x_1 - x_0 + 2km;\ y_2 = 2y_1 - y_0 + 2kn \ \text{ і } \ z_2 = 2z_1 - z_0 + 2kl, \qquad (1)$$

де $k = \frac{(x_0 - x_1)m + (y_0 - y_1)n + (z_0 - z_1)l}{m^2 + n^2 + l^2}$.

Зазначимо, що координати відбитого променя можна обчислити за формулами $\{x_{2-}x_1, y_{2-}y_1, z_{2-}z_1\}$. Звідси маємо ще одне твердження:

Твердження 2. Вирази для обчислення координат вектора відбитого променя мають вигляд

$$x_{BID} = x_1 - x_0 + 2km,\ y_{BID} = y_1 - y_0,\ z_{BID} = z_1 - z_0 + 2k, \qquad (2)$$

де $k = \dfrac{-f'_x(x_1)(x_0 - x_1) + (z_0 - z_1)}{f'^2_x(x_1) + 1}$.

Враховуючи твердження 2, визначимо координати одиничного вектора відбитого променя

$$x^E_{BID} = \frac{x_{BID}}{dis},\ y^E_{BID} = \frac{y_{BID}}{dis},\ z^E_{BID} = \frac{z_{BID}}{dis},$$

де $dis = \sqrt{x^2_{BID} + y^2_{BID} + z^2_{BID}}$.

Координати будь-якої точки на відбитому промені можна обчислити за формулами:

$$x = x_1 + x^E_{BID}t,\ y = y_1 + y^E_{BID}t \text{ і } z = z_1 + z^E_{BID}t, \qquad (3)$$

де t – величина, яка характеризує час розповсюдження хвилі вибуху.

Співвідношення (1–3) покладено в основу програми побудови наочних зображень елементів сім'ї фронтів вибухової хвилі. Програма написана для середовища процесора maple, що дозволило одержати й аналітичні описи фронтів вибухової хвилі, в залежності від параметра t, тобто від шляху, «пройденого» елементами поверхні.

Твердження 3. Для циліндричної поверхні, рівняння профілю якої має вигляд z=f(x), і точки $S(0, 0, z_0)$ як джерела променів, описом фронтів ударної хвилі будуть вирази

$$X(x,y) = 2m\frac{xm - z_0 + f(x)}{1+m^2} - 2\frac{x(m^2-1) - 2m(z_0 - f(x))}{A(1+m^2)}t;$$

$$Y(x,y) = 2yt/A, \qquad (4)$$

$$Z(x,y) = \frac{2f(x) + z_0(m^2-1) + 2xm}{1+m^2} - 2\frac{(z_0 - f(x))(m^2-1) + 2xm}{A(1+m^2)}t;$$

де $m = -f'(x)$ і $A = \sqrt{x^2 + y^2 + z_0^2 - 2z_0 f(x) + f^2(x)}$.

Твердження 4. Для «циліндричної» поверхні, рівняння профілю якої має вигляд z=0 (тобто відбивальною поверхнею є площина), і точки $S(0, 0, z_0)$ як джерела променів, описом фронтів ударної хвилі будуть вирази:

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

$$X(x,y)=\frac{xt}{A};\ Y(x,y)=\frac{yt}{A},\ Z(x,y)=z_0\left(\frac{t}{A}-1\right), \tag{5}$$

де $A=\sqrt{x^2+y^2+z_0^2}$.

Формули (5) можна вважати «граничним випадком» для виразів (4). Вони описують сім'ю концентричних сфер, центр яких розташовано в точці, що є симетричною точці $S(0, 0, z_0)$ відносно площини Oxy.

Твердження 5. Для параболічного циліндра $z=x^2/(2p)-p/2$ (з фокусом у початку координат) і точки $S(0, 0, z_0)$ як джерела променів опис сім'ї фронтів ударної хвилі має вигляд:

$$X(x,y)=\frac{x^2+p^2+2z_0p}{x^2+p^2}x-8\frac{xz_0p}{A(x^2+p^2)}t;$$

$$Y(x,y)=4yt/A; \tag{6}$$

$$Z(x,y)=\frac{(z_0-p)(x^2-p^2)}{(x^2+p^2)}+2\frac{(x^2+p^2)^2+2z_0p(p^2-x^2)}{Ap(x^2+p^2)}t,$$

де $A=\sqrt{p^4+4z_0p^3+2(2y^2+x^2+2z_0^2)p^2-4x^2z_0p+x^4}\ /|p|$.

На рис. 3 зображено сім'ю фронтів хвилі для циліндричної поверхні $z=0{,}5(x^2-1)$ і джерела променів в точці S. Для спостереження за розвитком елементів сім'ї була створена програма анімаційного фільму процесу відбиття.

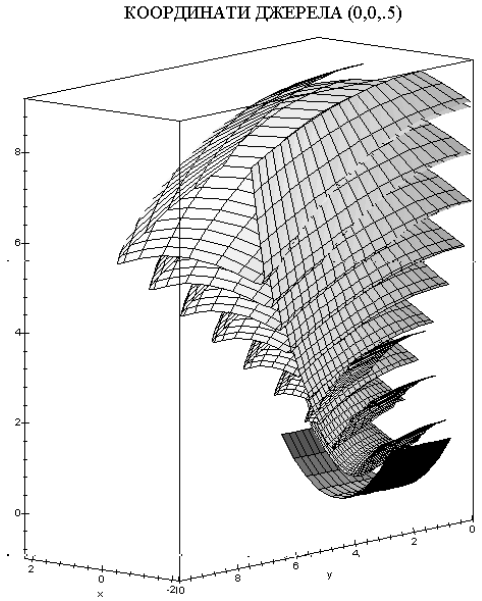


Рис. 3. Зображення сім'ї миттєвих фронтів вибухової хвилі

Слід звернути увагу на те, що фронти відбитих хвиль можуть самоперетинатися, утворюючи рухомі у просторі замкнуті «короби».

6. Формоутворення циліндричної поверхні, вигнутої подовжніми силами з металевого листа прямокутної форми

Розглянемо подовжній вигін стержня довжиною L. Тут прямий стержень утримується у зігнутому вигляді двома протилежними силами F, що давлять на його кінці. В роботі [4] показано, що для малих відхилень профіль подовжньо вигнутого стержня має вигляд синусоїди. «Довжина хвилі» λ цієї синусоїди в два рази більше відстані S між кінцями стержня. Якщо вигин невеликий, вона дорівнює подвоєній довжині невигнутого стержня.

Рівняння кривої має вигляд:

$$y = K \sin \frac{\pi x}{S}. \tag{7}$$

Беручи другу похідну, знаходимо $\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{\pi^2}{S^2} y$. Звідси одержимо оцінку сили:

$$F = \pi^2 \frac{YI}{S^2}, \tag{8}$$

де Y – модуль Юнга; I – момент інерції поперечного перетину листа.

Розглянемо результат згинання стержня. Якщо сила F менше обумовленої рівнянням (8), то ніякого подовжнього вигину не буде. Але якщо вона хоч трохи більше цієї сили, то стержень раптово зігнеться під дією сил, що перевищують критичну величину π^2 YI / L^2 (силу Ейлера).

Постійну К в рівнянні (7) визначимо за умови нормування довжини стрижня:

$$L = \int_0^S \sqrt{(dx)^2 + (dy)^2} = \int_0^S \sqrt{1 + y'^2}\, dx = \int_0^S \sqrt{1 + K^2 \frac{\pi^2}{S^2} \cos^2 \frac{\pi x}{S}}\, dx.$$

Далі слід врахувати, що згин є слабким, тобто K/S<<1. Тоді інтеграл можна обчислити шляхом розкладу підінтегрального виразу в ряд:

$$L = \int_0^S \left(1 + K^2 \frac{\pi^2}{2S^2} \cos^2 \frac{\pi x}{S}\right) dx = S + \frac{K^2 \pi^2}{4S}.$$

Звідси маємо $K = \frac{2\sqrt{(L-S)S}}{\pi}$. Отже, форму вигнутого профілю стержня можна описати за допомогою синусоїди:

$$y(x) = \frac{2\sqrt{(L-S)S}}{\pi} \sin \frac{\pi x}{S}. \tag{9}$$

За допомогою виразу (9) буде описано і профіль згину металевого листа, якщо його розглядати як сукупність стриженів, розташованих впродовж листа як показано на рис. 4.

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

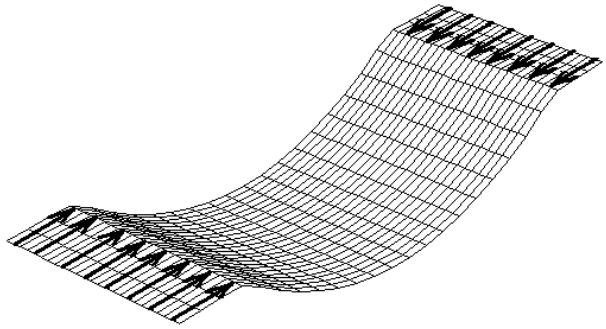


Рис. 4. Схема згину металевого листа системою подовжніх сил

В роботі [4] наведено формулу для обчислення сили згину листа довжиною L, в залежності від його товщини δ та ширини w

$$F = \frac{\pi^2 IYw\delta^3}{48L^2}. \qquad (10)$$

За допомогою формули (10) можна обчислити силу згину і у випадку металевого листа, якщо його розглядати як сукупність стержнів, розташованих вподовж листа, а силу F вважати рівномірно розподіленою вздовж краю листа.

Тобто виникає задача розрахунку ефекту відбиття від синусоїдальної кривої, що є профілем згину металевого листа прямокутної форми. Позначимо через H та S, відповідно, висоту та довжину згину стрижня. Оберемо декартову прямокутну систему координат Oxy і синусоїду на проміжку $[-\pi/2, \pi/2]$ опишемо рівнянням $y=k(1-\cos x)$.

Розглянемо спосіб визначення такого співвідношення між величинами H та S, щоб у разі розміщення джерела променів у точці A, відбиті від кривої промені були спрямовані «майже паралельно» деякому напрямку (тобто перетиналися у невласній точці). За конструктивними особливостями синусоїдального відбивача додатково вводиться наступне обмеження: точкове джерело вибуху повинно бути розташовано в площині, якій належать вершини чотирикутника листа після згину. Мовою геометрії це означає, що необхідно визначити таке значення k в рівнянні $y=k(1-\cos x)$, щоб для утвореної синусоїди її квазифокус був розташований на однаковому рівні з точками кінців її частини на проміжку $[-\pi/2, \pi/2]$.

7. Моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю

Нехай в декартовій прямокутній системі координат Oxy маємо рівняння $y = k(1-\cos x)$ відбивальної кривої. Джерело променів розташуємо в точці з координатами $S(x_0, y_0)$. Точку падіння променя на криву позначимо $M(x, k(1-\cos x))$. В точці падіння вектор нормалі матиме координати $\nu = \{k\sin_x x, 1\}$. Тут $k\sin_x x$ є значенням похідної функції $k(1-\cos x)$ в точці x. Опис відбитого променя базується на такому твердженні.

Твердження 6. Точки $S(x_0, y_0)$ і $K(x_2, y_2)$ будуть розташовані симетрично відносно прямої $\frac{X-x}{m} = Y - k(1-\cos x)$ (що є нормаллю до кривої у точці M) тоді, коли будуть виконуватися співвідношення

$$x_2 = 2x - x_0 + 2km\,;\; y_2 = 2f(x) - y_0 + 2k\,, \tag{11}$$

де $k = \dfrac{(x_0 - x)m + y_0 - k(1-\cos x)}{m^2 + 1}$ і $m = k \sin_x x$.

Отже, координати відбитого променя можна обчислити за формулами $\{x_2 - x,\; y_2 - y\}$, а вирази для обчислення координат будь-якої точки на відбитому промені (в залежності від t) мають вигляд

$$X = x + \frac{(x_2 - x)(t - d_{01})}{d_{02}}\,;$$

$$Y = k(1-\cos x) + \frac{(y_2 - k(1-\cos x))(t - d_{01})}{d_{02}}, \tag{12}$$

де t – величина, яка характеризує «час розповсюдження» фронту хвилі.

$$d_{01} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - k(1-\cos x))^2}\,,\; d_{02} = \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - k(1-\cos x))^2}\,.$$

У формулах (12) враховано шлях, що проходить кожний з променів до точки відбиття.

Було складено програму побудови сім'ї променів, які відбито синусоїдою $y = k(1-\cos x)$ за умови, що джерело променів має координати (0, k). Програма дозволила шляхом проведення машинних експериментів відшукати таке значення k, щоб виконувалася умова функціонування відбивальної системи. Показано, що коли джерело променів розмістити у точці з координатами (0; 0,7072) (ця точка названа квазифокусом), то відбиті синусоїдою y=0,7072 (1–cos x) промені будуть спрямовані «майже паралельно» вздовж осі Oy. Причому точка джерела променів буде розташована на одному рівні з кінцями фрагмента синусоїди на проміжку [–π/2, π/2].

Нехай в декартовій системі координат Oxyz профіль циліндричної поверхні описано рівнянням z=k(1–cos x). Джерело вибуху розташуємо в точці з координатами $S(x_0, y_0, z_0)$. Точку падіння променя на циліндричну синусоїдальну поверхню позначимо як $P(x_1, y_1, z_1)$. В точці падіння вектор нормалі поверхні матиме координати $\nu = \{k \sin_x(x_1), 0, 1\}$. Тут $k \sin_x(x_1)$ є значенням похідної функції k(1 – cos x) в точці x_1.

Алгоритм побудови променя, який відбито поверхнею, базується на такому твердженні.

Твердження 7. Точки $S(x_0, y_0, z_0)$ і $M(x_2, y_2, z_2)$ розташовані симетрично відносно прямої L: $\dfrac{x - x_1}{m} = \dfrac{y - y_1}{n} = \dfrac{z - z_1}{l}$ тоді, коли будуть виконуватися співвідношення.

$$x_2 = 2x_1 - x_0 + 2km\,;\; y_2 = 2y_1 - y_0 + 2kn \;\text{ і }\; z_2 = 2z_1 - z_0 + 2kl\,,$$

де $k = \dfrac{(x_0 - x_1)m + (y_0 - y_1)n + (z_0 - z_1)l}{m^2 + n^2 + l^2}$.

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

Зазначимо, що координати відбитого променя можна обчислити за формулами $\{x_2 - x_1,\ y_2 - y_1,\ z_2 - z_1\}$.

Звідси маємо ще одне твердження:

Твердження 8. Вирази для обчислення координат вектора відбитого від синусоїдального циліндра променя мають вигляд:

$$x_{BID} = x_1 - x_0 + 2\bar{k}m,\ y_{BID} = y_1 - y_0,\ z_{BID} = z_1 - z_0 + 2\bar{k}, \qquad (13)$$

де $\bar{k} = \dfrac{k \sin x_1 (x_0 - x_1) + (z_0 - z_1)}{f'^2_x(x_1) + 1}$.

Враховуючи твердження 3, визначимо координати одиничного вектора відбитого променя:

$$x^E_{BID} = \frac{x_{BID}}{dis},\ y^E_{BID} = \frac{y_{BID}}{dis},\ z^E_{BID} = \frac{z_{BID}}{dis},$$

де $dis = \sqrt{x^2_{BID} + y^2_{BID} + z^2_{BID}}$.

Координати точки на відбитому промені можна обчислити за формулами

$$x = x_1 + x^E_{BID} t,\ y = y_1 + y^E_{BID} t \ \text{ і } \ z = z_1 + z^E_{BID} t, \qquad (14)$$

де t – величина, яка характеризує час розповсюдження хвилі вибуху.

На рис. 5 наведено два ракурси окремих фаз фронту хвилі вибуху. При цьому, як приклад, опис перерізу циліндричної поверхні мав вигляд z=1–cos x. Зображено лише симетричну половину фронтів, де джерелом є точка S(0; 0; 1).

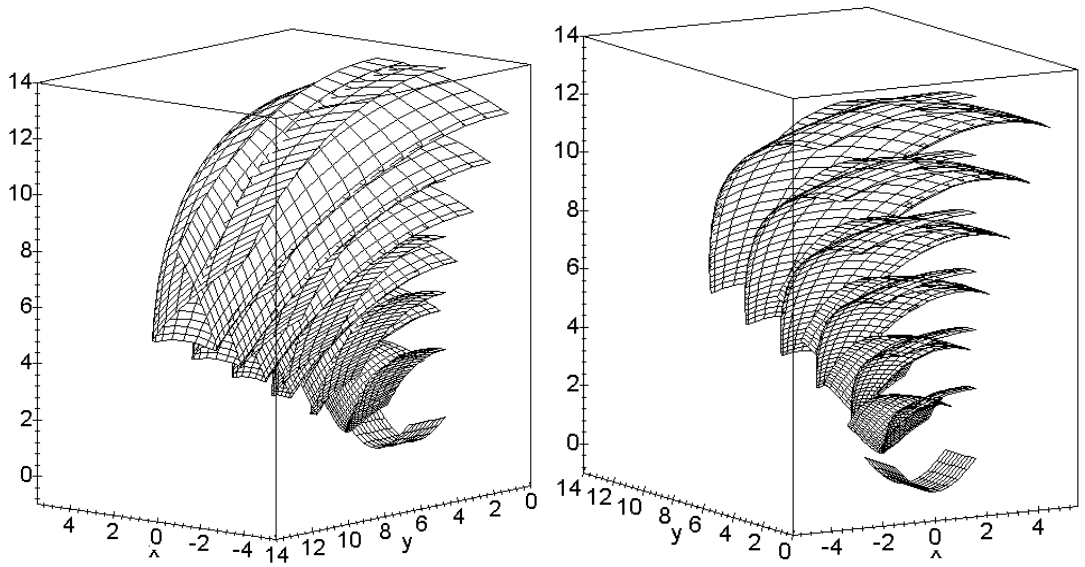


Рис. 5. Два ракурси фронтів хвилі для циліндричної поверхні z=1–cos x і джерела променів в точці (0; 0; 1)

Програма написана для середовища математичного процесора maple, що дозволило одержати й аналітичні описи сім'ї фронтів вибухової хвилі, в залежності від параметра t – як від шляху, пройденого елементами поверхні.

Твердження 9. Для циліндричної поверхні, рівняння профілю якої має вигляд z=k(1–cos x), і точки S(0, 0, z_0) як джерела променів, описом фронтів ударної хвилі будуть вирази:

$$X(x,y)=2m\frac{xm-z_0+k(1-\cos x)}{1+m^2}-2\frac{x(m^2-1)-2m(z_0-k(1-\cos x))}{A(1+m^2)}t;$$

$$Y(x,y)=2yt/A; \qquad (15)$$

$$Z(x,y)=\frac{2k(1-\cos x)+z_0(m^2-1)+2xm}{1+m^2}-2\frac{(z_0-k(1-\cos x))(m^2-1)+2xm}{A(1+m^2)}t,$$

де $m=k\sin x$ і $A=\sqrt{x^2+y^2+z_0^2-2z_0f(x)+k^2(1-\cos x)^2}$.

Враховуючи попередні твердження, одержимо головний результат роботи.

Твердження 10. Для циліндричної поверхні, профіль якої описано у вигляді z=p (1–cos x) і коли p=z_0=0,7072 як джерела променів, описом сім'ї фронтів ударної хвилі, що утворилася після відбиття від цієї поверхні, є:

$$X(t)=\frac{Ax\sin^2 x+625xt(1+\cos^2 x)-(1250t+A)\sin x\cos x}{A(1{,}5-0{,}5\cos^2 x)};\ Y(t)=\frac{yt}{A}; \qquad (16)$$

$$Z(t)=\frac{A-0{,}3334A\cos^2 x-1{,}3332A\cos x+416.52t\cos x+\ldots}{\ldots+416{,}7300t\cos^3 x+1666{,}5202xt\sin x-1{,}3332Ax\sin x}{A(1{,}4140-0{,}4714\cos^2 x)},$$

де $A=\sqrt{39062(x^2+y^2)+195364\cos^2 x}$.

На рис. 6 зображено результати роботи складеної програми.

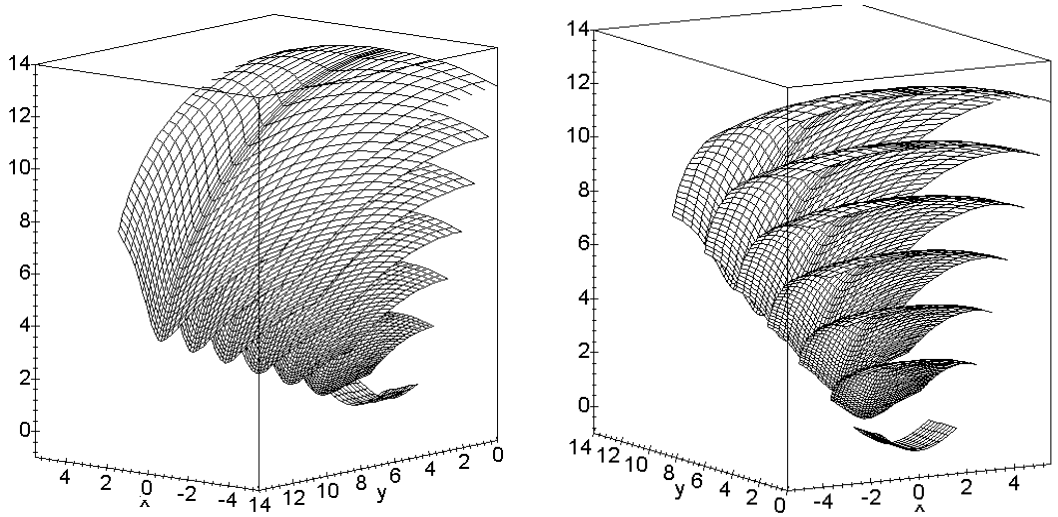


Рис. 6. Два ракурси симетричної частини фронтів хвилі для циліндричної поверхні z = 0,7072(1- cos x) і джерела (0; 0; 0,7072)

© Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

Слід зазначити, що на наведених в даній роботі рисунках зображені суміщені фронти відбитої хвилі. Динаміку одиночного фронту зручно спостерігати на анімаційному зображенні. Для цього було складено програму побудови анімації процесу формоутворення вибухової поверхні, відбитої від синусоїдального відбивача. Цікаво спостерігати за утворенням та розвитком геометричної картини відбитої хвилі. Залежно від параметрів форми відбитих хвиль часто мають вигляд «коробів», утворених завдяки самоперетину поверхні (рис. 5, рис. 7). Наявність таких «коробів» навело на думку їх використовувати як додаткові засоби «доставки» до пожежі вогнегасних речовин (наприклад, інертних газів).

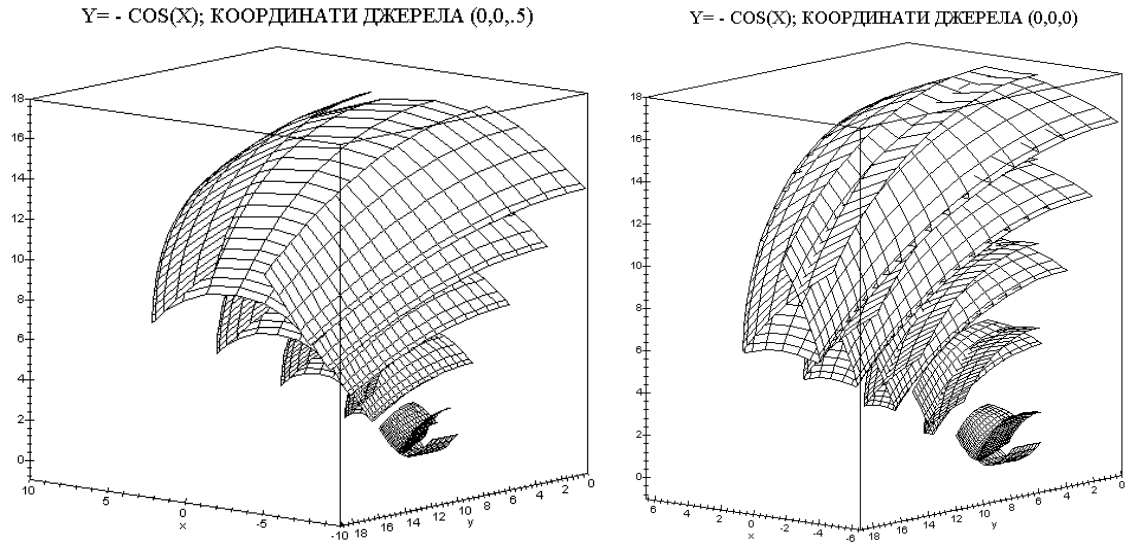


Рис. 7. Приклади хвиль, відбитих від циліндричної поверхні

До позитивних якостей графічного представлення поверхонь вибухових хвиль слід віднести можливість порівнювати інтенсивності дії хвилі за її конфігурацією та розмірами. На практиці зручно порівнювати площі елементарних просторових чотирикутників, які складають поверхню хвилі: чим більшою є площа чотирикутника, тим меншу інтенсивність дії хвилі він забезпечує.

Дійсно, наочно можна переконатися у тому, що інтенсивність ударної хвилі для параболічного циліндра буде більшою, порівняно з синусоїдальним циліндром. На це вказує «густина» координатних ліній поверхонь, яка припадає на одиницю об’єму простору. Переконатися в цьому можна, порівнюючи, наприклад (рис. 3 і рис. 6).

Наведене положення базується на тому, що ударна хвиля у необмеженому просторі матиме вигляд сфери радіусом R з центром в точці вибуху. Площа поверхні сфери дорівнюватиме $4\pi R^2/3$ одиниць. При цьому вся інтенсивність вибуху буде немов «розтерта», розподілена по поверхні сфери. Тоді в певній точці поверхні сфери інтенсивність вибуху з точністю до множника можна оцінити величиною $W=1/(4\pi R^2/3)$. Тобто залежністю $W_A = \frac{3}{4\pi R^2}$, яка виражає залежність вигляду «обернено пропорційно квадрату відстані» і узгоджується з загальнофізичними законами ослаблення поля в залежності від відстані. Розглянутий приклад дозволяє прийняти гіпотезу досліджень: інтенсивність дії ударної хвилі є величиною, оберненою до площі поверхні ділянок фронтів хвилі, які підпорядковані до закону гомотетії. На рис. 7 наведено приклади поверхонь хвиль, відбитих

від циліндричної поверхні, в залежності від положення джерела вибуху Зображення дозволяють «якісно» порівнювати інтенсивності їх дії.

8. Обговорення результатів моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні

Отримані результати пояснюються можливістю сформувати циліндричну відбивальну поверхню шляхом згинання металевого листа прямокутної форми системою подовжніх сил. Визначено необхідну величину згину металевого листа для утворення циліндричного відбивача синусоїдального профілю. Показано, якщо «точкову» вибухову речовину помістити в розраховане місце (квазифокус), то у нормальному перетині циліндра утвориться система «майже паралельних» відбитих променів (тут прийнято оптичний закон відбиття). Отримані результати одержані завдяки можливостям пакету maple здійснювати операції з аналітичними виразами, а також завдяки його можливостям унаочнювати результати обчислень у вигляді графічних зображень фронтів вибухових хвиль. При цьому поверхня елементу фронту системи відбитих променів будується за умови рівності відстаней проходження падаючого і відбитого променів.

Особливості запропонованого методу полягають у можливості здійснення оцінки енергетичних параметрів направленого вибуху шляхом аналізу геометричної моделі фронту відбитої вибухової хвилі. Для цього доцільно розглянути сім'ю «вибухових» променів, які відбито синусоїдальним екраном. Адже кожний з променів «несе на собі» частку вибухової енергії. Тому для досліджень інтерес викликає наочне зображення сім'ї променів, кінцеві точки яких утворюють фронти вибухових хвиль.

На рис. 1 зображено схему конструкції відбивача, який можливо виготовити безпосередньо на місці використання. Для цього прямокутний лист металу слід трохи зігнути на вказану в роботі величину та зафіксувати відрізками арматури за допомогою зварювання. В результаті отримаємо циліндричний відбивач, перетин якого наближатиме профіль синусоїди. Як тестовий приклад зображено (рис. 3) сім'ю миттєвих фронтів хвилі для циліндричної поверхні з профілем параболи (тут джерело вибухових «променів» розташоване у фокусі параболи). Спостерігати за розвитком елементів сім'ї зручно за допомогою створеного анімаційного фільму процесу відбиття. Зазначимо, що фронти відбитих хвиль можуть самоперетинатися, утворюючи рухомі у просторі замкнуті «короби». На рис. 4 наведено схему згину металевого листа системою подовжніх сил, описаних в роботі. Як ілюстрований приклад на рис. 5 наведено два ракурси окремих фаз фронту хвилі вибуху, коли опис перерізу циліндричної поверхні мав вигляд $z=1-\cos(x)$, а джерело розташовувалось в точці $S(0; 0; 1)$. Має місце самоперетин поверхонь фронтів відбиття, подібний тому, що показано на рис. 3. Кінцева мета наукового дослідження роботи полягала у знаходженні такого опису $z=0{,}7072(1-\cos x)$ циліндричної поверхні і розташування джерела вибуху в точці $(0; 0; 0{,}7072)$, щоб фронти відбитої хвилі мали вигляд, як на рис. 6. На поверхнях фронтів відбитої хвилі самоперетин відсутній. Це вказує на те, що енергія вибуху буде локально зосередженою.

Наведеним дослідженням притаманні обмеження, пов'язані з потужністю вибухової речовини і розмірами конструкції циліндричної поверхні синусоїдального профілю. Вони суттєво впливають на відстань дії фронту відбитої вибухової хвилі. Обґрунтування критеріїв вибору раціональних форм відбивачів для різних варіантів вибухових речовин може служити темою подальших досліджень.

 © Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

До недоліків запропонованого способу геометричного моделювання сім'ї фронтів вибухових хвиль слід віднести необхідність використовувати спеціальні заряди вибухових речовин, склад яких базується, наприклад, на суміші вибухонебезпечних газів. При цьому, процес вибуху доцільно організувати так, щоб підрив заряду був «розтягнутий» у часі. В результаті чого потрійна точка перетину трьох фронтів хвиль (падаючої, відбитої і головної) належатиме переважно падаючій та відбитій хвилям. Зазначений недолік може бути в перспективі усунений шляхом відповідного конструктивного оформлення заряду з метою забезпечення підриву заряду в режимі «розтягнутого» у часі.

Розвиток даного дослідження може полягати у розробці критеріїв вибору раціональних форм відбивачів для вибухових речовин у вигляді шлангових зарядів. Ці дослідження слід пов'язати з міцністю та довговічністю циліндричних відбивачів. Цікавими будуть дослідження стосовно тактичного забезпечення умов використання циліндричних відбивачів, встановлених на транспортних засобах. При цьому можна зіткнутися з труднощами визначення енергетичних характеристик утворених відбивальних систем за умови врахування «не оптичних» законів відбиття ударних хвиль.

Проведені дослідження сприятимуть розробці технологій боротьби з лісними пожежами за допомогою направлених вибухів і займуть відповідне місце в комплексі сучасних методів пожежогасіння. Одержані результати є корисними і важливими, адже вони дозволяють започаткувати нові устрої гасіння лісових пожеж.

9. Висновки

1. Розроблено геометричну модель фронту відбитої хвилі для циліндричної поверхні з профілем параболи. В основу програми побудови наочних зображень елементів сім'ї фронтів вибухової хвилі покладено знайдені співвідношення. Програма написана для середовища процесора maple, що дозволило одержати й аналітичні описи фронтів вибухової хвилі, в залежності від параметра часу. Для параболічного циліндра $z = x^2/(2p) - p/2$ (з фокусом у початку координат) і точки $S(0, 0, z_0)$ як джерела променів знайдено рівняння сім'ї фронтів ударної хвилі. В якості прикладу наведено фронти хвилі для циліндричної поверхні $z=0{,}5\ (x^2 - 1)$ і джерела променів в точці S.

2. Описано циліндричну поверхню синусоїдального профілю, одержану шляхом вигинання подовжніми силами металевого листа прямокутної форми. Такі відбивачі доцільно монтувати безпосередньо на місці використання шляхом незначного згинання прямокутного металевого листа та фіксування згину за допомогою прутів. Як конструктивну особливість синусоїдального відбивача слід відмітити таке: точкове джерело вибуху необхідно розташувати у площині, належній вершинам чотирикутника листа після згину.

3. Виконано моделювання фронтів вибухових хвиль, відбитих від циліндричної поверхні синусоїдального профілю. Складено програму побудови сім'ї променів, які відбито синусоїдою $y = k(1 - \cos x)$ за умови, що джерело променів має координати (0, k). Шляхом проведення комп'ютерних експериментів показано, що коли джерело променів розмістити у точці з координатами (0; 0,7072), то відбиті синусоїдою $y=0{,}7072\ (1-\cos x)$ промені будуть спрямовані «майже паралельно» вздовж осі Oy. Причому точка джерела променів буде розташована на рівні з кінцями фрагмента синусоїди на проміжку $[-\pi/2, \pi/2]$. До головних результатів роботи слід віднести твердження 10, в якому попередні положення під-

тверджені формулою для опису сім'ї фронтів ударної хвилі, що утворилася після відбиття від циліндричної поверхні синусоїдальної форми. Графічне представлення поверхонь вибухових хвиль дає можливість порівнювати інтенсивності дії хвилі за площами елементарних просторових чотирикутників, які складають поверхню хвилі: чим більшою є площа чотирикутника, тим меншу інтенсивність дії хвилі він забезпечує.

Література

1. Дубінін Д. П., Коритченко К. В., Лісняк А. А. Застосування зарядів з суміші вибухонебезпечних газів для локалізації лісових пожеж шляхом створення протипожежних бар'єрів: монографія. Харків: НУЦЗУ, 2017. 128 с. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/984

2. Рева Г. В. Метод розрахунку синусоїдальної відбивальної системи. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Київ: КДТУБА. 2000. Вип. 67. С. 226–230.

3. Рева Г. В., Куценко Л. М. Метод оцінки інтенсивності дії ударної хвилі направленого вибуху для гасіння лісових пожеж. Харків: ХІПБ МВС України, 1998. 80 с.

4. Feynman R. F, Leighton R. B., Sands M. The Feynman Lectures on Physics Problems and exercises with answers and solutions to produce 5–9 Manual – 5 th ed. Knizhnyy dom «LIBROKOM». 1 Jan, 2009. 512 p.

5. Налисько М. М. Розвиток наукових основ підвищення безпеки у протяжних спорудах при розповсюдженні ударних повітряних хвиль: дис. доктора тех. наук: 05.26.2001. Дніпро, 2019. 422 с.

6. Dey S., Murugan T., Chatterjee D. Numerical Visualization of Blast Wave Interacting with Objects. Journal of Applied Fluid Mechanics. 2018. Vol. 11. № 5. P. 1201–1206. doi: 10.29252/jafm.11.05.28240

7. Vaishnavi J. K., Krishna B. M. Determination of response of multistorey structure subjected to blast loading. Journal of Building Pathology and Rehabilitation. 2022. Vol. 7. № 1. doi: 10.1007/s41024-022-00218-6

8. Figuli L., Cekerevac D., Bedon C., Leitner B. Numerical Analysis of the Blast Wave Propagation due to Various Explosive Charges. Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 2020. P. 1–11. doi: 10.1155/2020/8871412

9. Gautier A., Sochet I., Courtiaud S. Analysis of Shock Wave Interaction with an Obstacle by Coupling Pressure Measurements and Visualization. Sensors. 2022. Vol. 22. № 9. P. 3325. doi: 10.3390/s22093325

10. Tai C. H., Teng J. T., Lo S. W., Chou H. C. Two-Dimensional Numerical Visualization on the Interaction of Blast Waves with Obstacles. Journal of Visualization. 2008. Vol. 11. № 1. P. 87–94. doi: 10.1007/BF03181918

L. Kutsenko, *DSc, Professor, Professor of the Department*
E. Sukharkova, *Lecturer of the Department*
D. Saveliev, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
V. Kohanenko, *PhD, Associate Professor, Lecturer of the Department*
M. Zhuravskij, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Center – Head of Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

GEOMETRIC MODELING OF BLAST WAVES REFLECTED FROM THE CYLINDRICAL SURFACE OF A SINEUSIDAL PROFILE

A method is proposed for geometric modeling of a family of blast wave fronts reflected from a cylindrical surface of a sinusoidal profile. The model of "optical" reflection is adopted as a basis, when

 © Л. М. Куценко, О. І. Сухарькова, Д. І. Савельєв, В. Б. Коханенко та ін.

for each incident virtual explosive “ray” the angle of reflection is equal to the angle of incidence. To illustrate the graphic-analytical approach, a test model of the formation of a family of reflected wave fronts for a cylindrical parabolic surface has been developed. A cylindrical surface of a sinusoidal profile obtained by bending a rectangular metal sheet by longitudinal forces is considered. Geometric models of a family of blast wave fronts reflected from a cylindrical surface of a sinusoidal profile are described. Maple has been compiled – programs for visualizing models of a family of blast wave fronts reflected from a cylindrical surface. Conducted studies of sinusoidal cylindrical reflectors designed to demonstrate the effect of multiplying the effects of shock blast waves directed towards the fire zone. For their practical use, it is necessary to find the bending parameters of the cylinder such that the virtual beams of the “point” explosive are transformed into a system of beams that are close to parallel in the fire zone. As a result of the research, the parameters of bending of a metal rectangular sheet by longitudinal forces were calculated, and the coordinates of the location of the “point” explosive substance were determined. It is taken into account that cylindrical reflectors with a sinusoidal profile can be manufactured at the site of their use. To do this, a rectangular sheet of metal must be bent by longitudinal forces and the bend must be fixed by welding reinforcement rods. The research carried out is aimed at developing the technology of extinguishing forest fires with directed explosions.

Keywords: blast wave, cylindrical surface, reflector, sinusoidal profile, reflected wave front

References

1. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisniak, A. (2017). Zastosuvannia zariadiv z sumishi vybukhonebezpechnykh haziv dlia lokalizatsii lisovykh pozhezh shliakhom stvorennia protypozhezhnykh barieriv: monohrafiia. Kharkiv: NUTsZU, 128. Available at: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/984

2. Reva, H. (2000). Metod rozrakhunku synusoidalnoi vidbyvalnoi systemy. Prykladna heometriia ta inzhenerna hrafika, 67, 226–230.

3. Reva, H., Kutsenko, L. (1998). Metod otsinky intensyvnosti dii udarnoi khvyli napravlenoho vybukhu dlia hasinnia lisovykh pozhezh. Kharkiv: KhIPB MVS Ukrainy, 80.

4. Feynman, R., Leighton, R., Sands, M. (2009). The Feynman Lectures on Physics Problems and exercises with answers and solutions to produce 5–9 Manual – 5 th ed. Knizhnyy dom «LIBROKOM», 512.

5. Nalysko, M. (2019). Rozvytok naukovykh osnov pidvyshchennia bezpeky u protiazhnykh sporudakh pry rozpovsiudzhenni udarnykh povitrianykh khvyl: dys. doktora tekh. nauk: 05.26.2001. Dnipro, 422.

6. Dey, S., Murugan, T., Chatterjee, D. (2018). Numerical Visualization of Blast Wave Interacting with Objects. Journal of Applied Fluid Mechanics, 11, 5, 1201–1206. doi: 10.29252/jafm.11.05.28240

7. Vaishnavi, J., Krishna, B. (2022). Determination of response of multistorey structure subjected to blast loading. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 7, 1. doi: 10.1007/s41024-022-00218-6

8. Figuli, L., Cekerevac, D., Bedon, C., Leitner, B. (2020). Numerical Analysis of the Blast Wave Propagation due to Various Explosive Charges. Advances in Civil Engineering, 2020, 1–11. doi: 10.1155/2020/8871412

9. Gautier, A., Sochet, I., Courtiaud, S. (2022). Analysis of Shock Wave Interaction with an Obstacle by Coupling Pressure Measurements and Visualization. Sensors, 22, 9, 3325. doi: 10.3390/s22093325

10. Tai, C., Teng, J., Lo, S., Chou, H. (2008). Two-Dimensional Numerical Visualization on the Interaction of Blast Waves with Obstacles. Journal of Visualization, 11, 1, 87–94. doi: 10.1007/BF03181918

Надійшла до редколегії: 26.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

УДК 656.7:656.8

***В. В. Матухно*[1]**, *к.т.н., заст. нач. каф. (ORCID 0000-0002-9713-7710)*
***Є. В. Морщ*[2]**, *д.т.н., головний інспектор (ORCID 0000-0003-0131-2332)*
***Р. В. Корнієнко*[1]**, *к.т.н., н.с. відділу (ORCID 0000-0003-4854-283X)*
***С. А. Вавренюк*[1]**, *д.держ.упр., проф. каф. (ORCID 0000-0002-6396-9906)*
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*Департамент запобігання надзвичайним ситуаціям апарату ДСНС, Київ, Україна*

СКОРОЧЕННЯ ЧАСУ НЕТЕХНІЧНОГО ОБСТЕЖЕННЯ ІМОВІРНО ЗАБРУДНЕНОЇ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИМИ ПРЕДМЕТАМИ ТЕРИТОРІЇ

Розроблено «комбінований» метод практичного дослідження в рамках нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території, який дозволить скоротити час такого обстеження та зменшити ризик травмування особового складу піротехнічних підрозділів за рахунок відсутності фізичного контакту особового складу з імовірно забрудненою територією. Розроблено математичну модель «комбінованого» методу практичного дослідження імовірно забрудненої території вибухонебезпечними предметами при нетехнічному обстеженні. Математичну модель отримано за результатами збору непрямих доказів, де не визначено статус вибухонебезпечного предмета. Розроблено керуючий алгоритм реалізації «комбінованого» запропонованого методу, де враховано площу підозрілої небезпечної території, яку здатна обстежити одна група нетехнічного обстеження за результатом збору прямих та непрямих доказів. Окрім того, при побудові алгоритму були враховані таки показники як: кількість груп, рівень і вид їх оснащення. Алгоритм складається з 12 блоків, які розмішені на 7 ієрархічних рівнях і зв'язані прямими та зворотними зв'язками. При визначенні площі, яка підлягає очищенню від вибухонебезпечних предметів, враховано площу території, яка отримала підтвердження статусу небезпечної зони та площу території підтвердженої небезпечної зони під час перевірки непрямих доказів імовірно забрудненої території за методом виключення даної території із загальної площі імовірно забрудненої території. Реалізація запропонованого методу (за рахунок візуалізації місцевості в 3-D проекції з визначенням точних географічних координат локальних та загальних зон небезпечної території) дозволить в 3,9 рази скоротити час проведення нетехнічного обстеження, а також зменшити час суцільного розмінування та вивільнення земель від вибухонебезпечних предметів, підвищити рівень безпеки цивільного населення в очищених районах.

Ключові слова: вибухонебезпечний предмет, небезпечна територія, гуманітарне розмінування, піротехнічні підрозділи, нетехнічне обстеження

1. Вступ

З початку повномасштабного військового вторгнення російської федерації на територію України, було забруднено вибухонебезпечними предметами (ВНП) близько 25 200000 га площі, це більше ніж майже 1/3 території України, яка є підозріло небезпечною територією та потребує перевірки.

За 566 днів війни підрозділами ДСНС обстежено 93824 га, було знайдено та знешкодженою майже 428380 одиниць ВНП. Для виконання цих завдань підрозділи залучалися 69249 разів.

Процес розмінування є клопітким та ретельним, враховуючи, що дані роботи відносяться до робіт з підвищеним ризиком, це обумовлює дотримання заходів безпеки, що першочергово підвищує безпеку саперів, але має досить повільний час реалізації.

За найоптимістичнішими прогнозами за наявними методами обстеження підозріло небезпечної території та її розмінування потрібно від 15 до 30 років із залученням великої кількості особового складу та техніки. Але остаточне прогнозування можливо буде сформувати лише після закінчення ведення бойових дій та проведення загального нетехнічного обстеження (НТО) [9].

Згідно статистичних даних регіони після деокупації та завершення бойових

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

дій, діляться на зони:

– території, де активно велись бойові дії;

– території, де знаходились позиції ворожих військ;

– територія, де відбувалося дистанційне мінування;

– територія, яка піддавалася артилерійським обстрілам, обстрілам з систем залпового вогню та авіабомбардуванню.

Велика частина підозрілої небезпечної території припадає на НТО. З 100 % підозрілої небезпечної території на НТО припадає близько 80 %, найчастіше до даного виду відноситься територія, яка піддавалася артилерійським обстрілам, обстрілам з системам залпового вогню та авіабомбардуванню.

Термін «нетехнічне обстеження» включає всі заходи, здійснювані без застосування технічних засобів, включаючи «кабінетне» оцінювання території, аналіз історичних записів та широкий діапазон інших функцій збору та аналізу інформації, а також фізичне відвідування ділянок проведення польових робіт. У центрі всіх елементів нетехнічного процесу знаходяться операції виявлення, отримання доступу, збору інформації, доповіді та використання інформації. Вони допомагають визначити де можна знайти ділянки, які забрудненні ВНП, а також де їх виявлення малоймовірне; вони використовуються додатково до процесів прийняття рішень за винятком, скорочення та очищення земель.

Таким чином, значний час, що потребує проведення НТО території, яка забруднена ВНП, обумовлює актуальність проблеми по відчуженню таких територій та не можливості використання їх за прямим призначенням, наприклад, для проведення сільськогосподарських робіт, що в подальшому впливає на економічний розвиток країни.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На основі міжнародного досвіду та досвіду приватних компаній «The HALO Trust», «Danish Demining Group (DDG)», «SwissFoundationforMineAction (FSD)», «UnitedNations Office forProjeetServiees (UNOPS)» та ін., у сфері протимінної діяльності вироблені стандарти та алгоритми дій повного процесу гуманітарного розмінування.

Міжнародний стандарт [1] повністю розкриває метод НТО, на базі якого розроблено стандартну операційну процедуру [2] та інтегровано її в роботу піротехнічних підрозділів ДСНС.

В роботі [3] наведені результати досліджень впливу гуманітарного розмінування з використанням об’єктивної класифікації приміського земельного покриву та морфологічного виявлення будівель із зображенням VHR Worldview. Показано, що це дослідження мало дві основні цілі: скласти карту ґрунтового покриву після розчищення та виявити і кількісно визначити зміни в кількості та площі будівель. Було реалізовано та оцінено два незалежні робочі процеси. Щоб скласти карту ґрунтового покриву у цьому дослідженні було реалізовано два різних алгоритми: на основі об’єктів класифікації зображень та супутникових зображень VHR (Worldview-1,2,3). Але залишилися не вирішеними питання, пов’язані з формування трьохвимірної картографічної проекції імовірно забрудненої території. Причиною цього можуть бути відсутність в базовому алгоритмі технології Real Time Kinematic (RTK), яка дозволяє підтримувати поправки до вимірювання та встановлювати місце розташування з сантиметровою точністю в режимі реального часу за допомогою приймача GNSS в мережевих діях референтних GNSS станцій.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути застосування сучасних безпілотних літальних апаратів (БпЛА), які в базовій комплектації матимуть таку технологічну функцію. Все це дає підстави стверджувати, що дана проблема є доцільною щодо проведення дослідження, присвяченого скороченню часу НТО за рахунок використання БпЛА з технологією RTK при формуванні картографічної проекції імовірно забрудненої місцевості.

В роботі [4] наведені результати досліджень виявлення наземних мін за допомогою гіперспектрального зображення. Показано, що ця техніка дає можливість дистанційно ідентифікувати склад кожного пікселя зображення. Таким чином, він є основним методом для цілей виявлення протипіхотних мін, завдяки своїй притаманній безпеці та швидкому часу відгуку. Але залишилися не вирішеними питання, пов'язані з формуванням картографічної проекції в реальному часі. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з роботою в зонах з магнітними аномаліями. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути використання обладнання, яке матиме пряму прив'язку до WGS-84. Саме такий підхід використаний в роботах [5, 8]. Однак, в даному дослідженні не сказано про використання технологій, які підвищать точність позиціонування об'єкту на місцевості. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, спрямованого на підвищення точності позиціонування об'єкту в зонах з аномальною магнітною активністю. Недоліком даного підходу є простота методу в якому враховується тільки ідеальна поверхня місцевості з максимальною зміною рельєфу до 1 м.

В роботі [6] наведені результати досліджень швидкості сегментації та класифікації даних дистанційного зондування за допомогою пікселів SLIC. Показано, що швидкість і точність є важливими факторами при роботі, які пов'язані з часовими обмеженнями, для запобігання катастроф, ризиків і нестандартних екстрактних ситуацій. Об'єктний аналіз зображень може бути трудомістким завданням для отримання інформації з великих зображень, оскільки більшість алгоритмів сегментації використовують піксельну сітку для початкового представлення об'єкта чи місцевості. Класифікація на основі суперпікселів SLIC мала подібні або вищі загальні значення точності порівняно з класифікацією на основі MRS, але результати були отримані швидко й без параметризації MRS. Ці два підходи мають потенціал для покращення автоматизації аналізу та обробки великих даних дистанційного зондування, особливо коли час є важливим обмеженням. Але залишилися не вирішеними питання, пов'язані з класифікацією території за типом небезпек. Причиною цього можуть бути принципова неможливість застосування даного методу на місцевості, яка за своїм типом відноситься до небезпечної. Варіантом подолання відповідних труднощів може бути систематична класифікація підозрілої території. Саме такий підхід використаний в роботах [7, 10]. Однак, в роботах не враховується виключення території на початковому етапі як потенційно небезпечної. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого класифікації території, яка в подальшому впливає на швидкість реалізації поставлених завдань. Недоліком підходу по класифікації території є не виключення небезпечної території з пілотного завдання.

Таким чином, невирішеною частиною розглянутої проблеми є не врахування класифікації підозрілої з точки зору забруднення вибухонебезпечними предметами території та використання тепловізійного спектру для формування картографічної проекції місцевості.

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка «комбінованого» методу для скорочення часу проведення нетехнічного обстеження при перевірці імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– розробити математичну модель «комбінованого» методу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території;

– розробити керуючий алгоритм реалізації «комбінованого» методу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території;

– перевірити ефективність застосування «комбінованого» методу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є нетехнічне обстеження на етапі перевірки імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території.

Предметом дослідження є скорочення часу нетехнічного обстеження на етапі перевірки імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території.

Наявні методи нетехнічного обстеження є ефективними, але потребують вдосконалення, тому для збільшення ефективності роботи наявного методу НТО було побудовано «комбінований» метод, який базуватиметься на експериментальному методі дослідження з використанням Matrice 300 RTK, що дасть можливість перевірити отриманий результат.

Під час класифікації підозрілої території був використаний метод аналізу статистичних даних на основі комплексу The Information Management Systemfor Mine Action, який включає пристрої опрацювання і зберігання отриманої інформації про протимінну діяльність на потрібній для розрахунку території.

5. Розробка математичної моделі «комбінованого» методу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території

Нетехнічне обстеження імовірно забруднених територій не слід проводити у відриві від наступних заходів – у рамках процесу вивільнення земель. Постійне вдосконалення процесів та процедур НТО впливає на ефективність періоду проведення даного етапу в рамках гуманітарного розмінування.

Позначимо площу території, яка є «підозріло небезпечною територією» та підлягає НТО через $S_{\text{ПНбТ}}$. Тоді **перша задача**, яка потребує розв'язання, це визначення території, яка відноситься до імовірно забрудненої території, де за результатами збору непрямих доказів не визначено статус ВНП, і яка потребує підтвердження. Для виконання цієї задачі необхідно визначити площу $S_{\text{Обс.ІЗТ}}$ та кількість груп НТО n.

Загальна площа підозріло небезпечної території визначається за допомогою аналітичних методів на основі попередніх статистичних даних територіального органу управління ДСНС з наступним схематичним зображенням та встановленням реперних точок, яка матиме вигляд:

$$S_{\text{Обс.ІЗТ}} = S_{\text{ПНбТ}} \cdot r, \quad (1)$$

де $S_{ПНбТ}$ – загальна площа підозрілої небезпечної території (га), яка підлягає нетехнічному обстеженню; r – аналітичний коефіцієнт визначення межі імовірно забрудненої території.

Результати проведеної роботи оформляються у вигляді схематичного плану «підозріла небезпечна територія».

Якщо кожна із груп здатна обстежити територію площею $S_{Обс.ІЗТ}$ та $S_{Обс.НбТ}$, тоді з врахуванням кількості груп НТО приблизний час обстеження всієї підозрілого небезпечної території площею $S_{ПНбТ}$ буде визначатись відповідно до:

$$t_{Обст.ПНбТ} = \frac{S_{ПНбТ}}{n \cdot S_{Обс.НбТ}} + t_{Обс.ІЗТ_{i,j}}, \quad (2)$$

де $t_{Обс.ПНбТ}$ – час обстеження всієї підозрілої небезпечної території (год); n – кількість груп НТО; $S_{Обс.НбТ}$ – площа підозрілої небезпечної території (га), яку здатна обстежити одна група НТО за результатом збору прямих доказів; $t_{Обс.ІЗТ_{i,j}}$ – час нетехнічного обстеження імовірно забрудненої території (год), за результатами збору непрямих доказів в залежності від методу.

Очевидно, що кількість позаштатних розрахунків НТО n буде визначатися рішенням керівника територіального органу управління ДСНС.

Кількість особового складу, яка буде задіяна для виконання робіт, обчислюється наступним чином:

$$N = n \cdot \sum_{i=1}^{m} l_i, \quad (3)$$

де N – кількість особового складу, який задіяне для виконання робіт з НТО; l_i – кількість спеціалістів і-того типу в одній групі НТО; m – кількість типів спеціалістів в одній групі НТО.

Таким же чином підходимо і до визначення необхідного технічного оснащення для виконання робіт. Тоді загальна кількість необхідного технічного оснащення буде складати:

$$K = n \cdot \sum_{i=1}^{k} d_i, \quad (4)$$

де K – кількість необхідного технічного оснащення для виконання робіт; d_i – кількість технічного оснащення і-того типу в одній групі НТО; k – кількість типів технічного оснащення в одній розвідувальній групі.

Результатом вирішення першої задачі буде визначення площі території, яка матиме категорію «підтверджено небезпечна територія» та «імовірно небезпечна територія»:

$$S_{ВНП} = S_{ПНбТ} - (S_{ПДНбТ} + S_{ІЗТзНбТ}), \quad (5)$$

де $S_{ВНП}$ – площа території (га), яка підлягає очищенню від ВНП; $S_{ПДНбТ}$ – площа

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

«підтверджено небезпечна територія» (га) за результатами збору прямих доказів; $S_{\text{ІЗТзНбТ}}$ – площа «підтверджено небезпечна територія» за результатами НТО імовірно забрудненої території (га), при перевірці непрямих доказів.

За результатами кожного етапу НТО складаються відповідні звітні графічні документи із зображенням на них основних елементів небезпечної території.

Наступним кроком є вирішення проблеми ефективності проведення НТО імовірно забрудненої території, тобто розв'язання **другої задачі** – визначення часових параметрів практичного дослідження при зборі непрямих доказів. Площа, де в ході збору прямих або непрямих доказів практичного дослідження, НТО встановлена наявність ВНП, відноситься до «підтверджено небезпечна територія», а площа, де не встановлена наявність ВНП, – відноситься до «імовірно забрудненої території», яка відповідно до аналітичного досвіду складає 90 % від $S_{\text{ПНбТ}}$. Враховуючи аналітичний досвід, необхідно провести перевірку ефективності наявного методу практичного дослідження при перевірці непрямих доказів та запропонованого «комбінованого» методу, який не виключає елементи наявного методу дослідження, а навпаки вдосконалює його за рахунок використання БпЛА з тепловізійним спектром для формування картографічної сітки з визначенням географічних координат локальних зон «небезпечна територія».

Наявний метод практичного дослідження перевірки непрямих доказів, матиме вигляд:

$$t_{\text{Обс.ІЗТ}_i} = t_{\text{СТ}i} + \frac{S_{\text{Обс.ІЗТ}}}{S_{\text{Обс. сап.пр.}}} \cdot V_{\text{сап.при.НТО}}, \tag{6}$$

де $t_{\text{Обс.ІЗТ}_i}$ – час, який необхідно саперу для обстеження імовірно забрудненої території за результатами непрямих доказів (год); $t_{\text{СТ}i}$ – час, який необхідно саперу (год), для виходу на стартову точку імовірно забрудненої території; $S_{\text{Обс. сап.пр.}}$ – площа проходу при обстеженні одним сапером (га), яка є імовірно забрудненою та підлягає нетехнічному обстеженню; $V_{\text{сап.при.НТО}}$ – швидкість сапера при нетехнічному обстеженню імовірно забрудненої території на пересіченій місцевості.

«Комбінований» метод практичного дослідження збору непрямих доказів, матиме вигляд:

$$t_{\text{Обс.ІЗТ}_j} = t_{\text{СТ}j} + \frac{S_{\text{Обс.ІЗТ}}}{S_{\text{Обс.БпЛА}}} \cdot V_{\text{БпЛА}} + t_{\text{Ф.К.}} + t_{\text{Під.зон.}}, \tag{7}$$

де $t_{\text{Обс.ІЗТ}_j}$ – час, який необхідно БпЛА для обстеження імовірно забрудненої території за результатами непрямих доказів (год); $t_{\text{СТ}i}$ – час, який необхідно БпЛА (год), для виходу на стартову точку імовірно забрудненої території; $S_{\text{Обс.БпЛА}}$ – площа проходу при обстеженні одним БпЛА (га), яка є імовірно забрудненою та підлягає нетехнічному обстеженню; $V_{\text{БпЛА}}$ – швидкість БпЛА при нетехнічному обстеженні імовірно забрудненої території на пересіченій місцевості; $t_{\text{Ф.К.}}$ – час формування картографічної 3-D моделі (год); $t_{\text{Під.зон.}}$ – час проведення контролю якості та присвоєння локальним зонам статусу відповідної території (год).

Таким чином, запропонована математична модель щодо скорочення часу проведення нетехнічного обстеження на етапі перевірки імовірно забрудненої території, дозволяє оцінити ефективність застосування «комбінованого» методу перевірки непрямих доказів під час проведення НТО, оцінити загальну кількість особового складу та необхідну загальну кількість технічного оснащення для поставлених завдань.

6. Розробка алгоритму «комбінованого» методу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території

Нетехнічне обстеження імовірно забруднених вибухонебезпечними предметами територій не слід проводити у відриві від наступних заходів – у рамках процесу вивільнення земель від ВНП. Ефективне нетехнічне обстеження не тільки вирішує нагальні питання щодо характеру та масштабу небезпечних зон, але й надає інформацію, яка дозволяє зробити всі наступні етапи процесу вивільнення земель від ВНП більш ефективними та надійними.

Постійне вдосконалення процесів та процедур нетехнічного обстеження спирається на перегляд показників ефективності у світлі того, що згодом було виявлено у небезпечних зонах, у тому числі з урахуванням відомостей про небезпечні предмети, які були або не були виявлені в ході оперативних технічних заходів, а також результатів довгострокового моніторингу територій після вивільнення земель.

Алгоритм (рис. 1) складається з 7 блоків, які розміщені на 5 ієрархічних рівнях.

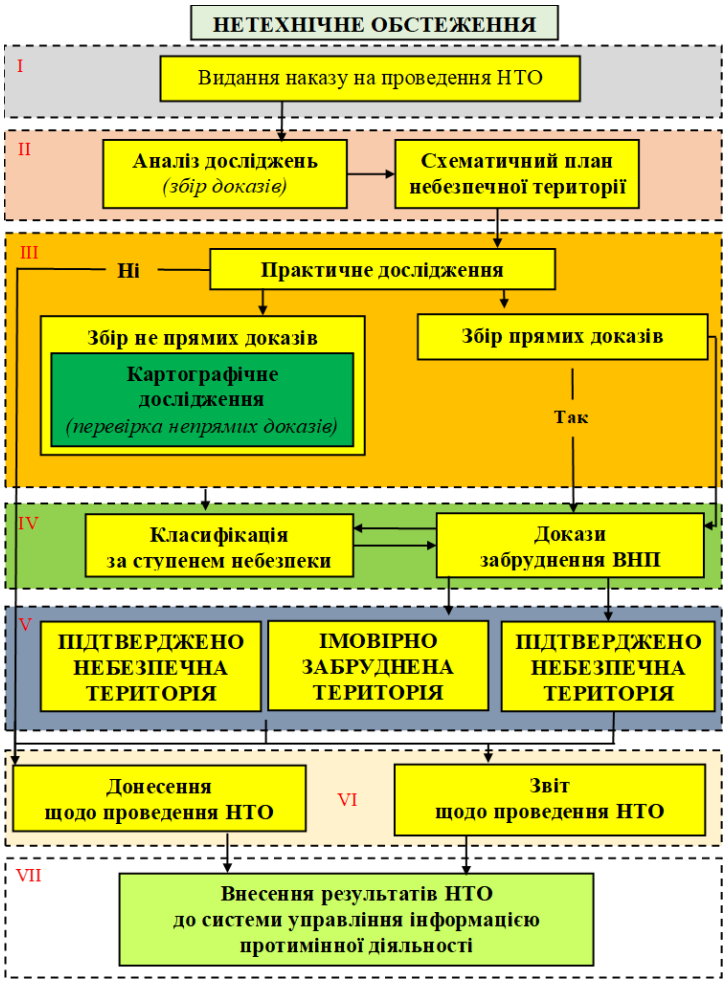


Рис. 1. Керуючий алгоритм проведення нетехнічного обстеження та класифікації території за статусом небезпеки

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

Перший рівень є початковим блоком, який відповідає за формування та видання наказу на проведення НТО території рішенням керівника територіального органу управління ДСНС, на основі якого формуються позаштатні розрахунки НТО.

Другий рівень складається з аналітичного блоку, де проводяться дослідження шляхом збору доказів (усі доступні джерела інформації) щодо імовірності забруднення територій ВНП, їх аналіз та класифікація за статусом небезпеки. При цьому виїзд безпосередньо до території, стосовно якої виникла підозра щодо забруднення ВНП, не здійснюється. Результати проведення аналітичного дослідження оформлюються як схематичний план та надаються до структурного підрозділу (фахівця) територіального органу управління ДСНС, до функцій і повноважень якого належить організація піротехнічних робіт та гуманітарного розмінування.

Третій рівень є рівнем практичного дослідження, де відбувається підтвердження доказів аналітичних досліджень другого рівня та збір прямих доказів від інформатора і збір непрямих доказів під час опитування населення, де встановлюються межі зони можливого ВНП. На основі таких даних з отриманням реперних точок є можливість використання «комбінованого» методу, який дає можливість формування картографічної проекції місцевості (рис. 2).

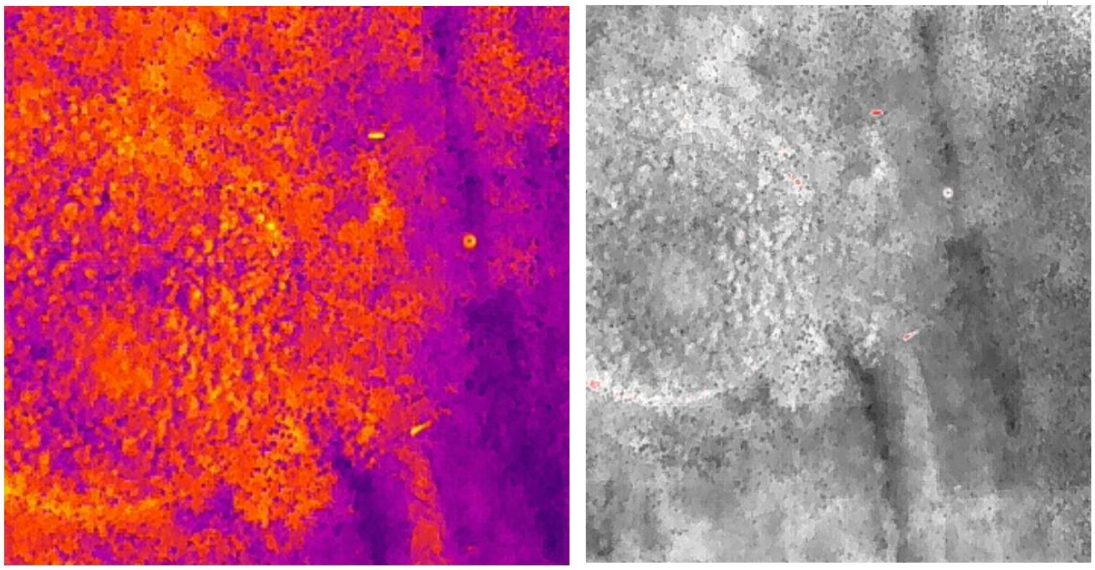


Рис. 2. Експериментальне формування картографічної проекції місцевості

Четвертий рівень складається з двох блоків, де після збору прямих та непрямих доказів (у разі виявлення ВНП) визначається класифікація ВНП за ступенем небезпеки. У разі відсутності доказів забруднення ВНП – слід переходити до шостого рівня.

Рівень п’ять, є продовженням рівня чотири і має на меті визначення статусу території в виду отриманих доказів.

Шостий рівень складається з двох блоків, які є відображенням роботи третього та п’ятого рівнів. В ньому висвітлюється інформація щодо проведення НТО на остаточному етапі.

Сьомий рівень має один блок та є останнім етапом, де не в залежності від рівня території, інформація заноситься в систему протимінної діяльності.

Таким чином, керуючий алгоритм скорочення часу нетехнічного обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території, реалізує розроблений метод. Алгоритм складається з 12 блоків, які розмішені на 7 ієрархічних рівнях і зв’язані прямими та зворотними зв’язками.

7. Перевірка ефективності застосування алгоритму обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території

Особливості застосування «комбінованого» методу практичного дослідження при НТО дозволяє зменшити ризик травмування особового складу групи НТО за рахунок виключення їх із процесу перевірки імовірно забрудненої території на наявність зон небезпеки.

Результати розрахунку ефективності застосування «комбінованого» методу практичного дослідження НТО на імовірно забрудненій вибухонебезпечними предметами території площею 10 га наведені в табл. 1.

Табл. 1. Результати розрахунку ефективності застосування «комбінованого» методу практичного дослідження НТО на імовірно забрудненій ВНП території

Метод перевірки непрямих доказів	$t_{Обст.ПНбТ}$, год
Наявний метод перевірки непрямих доказів практичного дослідження імовірно небезпечної території при нетехнічному обстеженні території	20 год 56 хв
«Комбінований» метод перевірки непрямих доказів практичного дослідження імовірно небезпечної території при нетехнічному обстеженні території	5 год 21 хв

Таким чином, в результаті досліджень встановлено, що при застосуванні «комбінованого» методу практичного дослідження при НТО ефективність часових показників значно краща в порівнянні з наявним методом практичного дослідження при проведенні НТО імовірно забрудненої території.

8. Обговорення результатів експериментальних досліджень алгоритму обстеження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території

Аналіз показників, які було отримано у ході перевірки запропонованого методу, дає можливість зрозуміти високу ефективність «комбінованого» методу, який пояснюється новим підходом до виконання робіт з підвищеним ризиком, виключаючи присутність особового складу групи НТО в зоні ураження від ВНП та зменшення загального часу проведення НТО.

Порівняльний аналіз запропонованого «комбінованого» методу НТО та існуючого полягає у більш ефективній та продуктивній роботі групи НТО по обстеженню імовірно забрудненої території, що призведе до коректного та швидкого визначення підозрілих зон з визначення їх географічних координат.

Даний метод має складнощі процесу обмеження при дослідженні ефективності застосування «комбінованого» методу, що можуть бути викликані недостатнім обсягом або не коректністю достовірних статистичних даних про приналежність території до підозріло небезпечної та підбором БпЛА, який буде обмежуватися часовими параметри виконання польотного завдання та якості формування картографічної проекції місцевості.

Одним з недоліків даного методу є відсутність врахування метеорологічних показників, які можуть збільшити виконання польотного завдання під час несприятливих метеорологічних умов. В подальшому даний недолік можливо вирішити за рахунок використання інноваційних технологій по стабілізації БпЛА.

Подальший розвиток запропонованого «комбінованого» методу повинен бути спрямованим на експериментальне дослідження впливу метеорологічних умов при проведенні нетехнічного обстеження, що може збільшити час проведення НТО.

9. Висновки

1. Розроблено математичну модель «комбінованого» методу практичного

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

дослідження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території при нетехнічному обстеженні з в рахуванням міжнародного досвіду в сфері протимінної діяльності із застосуванням новітніх технологій безпілотного сканування рельєфу місцевості. Запропоновано включення до етапу нетехнічного обстеження картографічного дослідження, яке на відмінну від наявного методу дозволить забезпечити візуалізацію небезпечної території в реальному часі. При формуванні математичної моделі не враховувались метеорологічні показники, які можуть збільшити час виконання польотного завдання під час несприятливих умов.

2. Для підвищення ефективності розроблено керуючий алгоритм реалізації «комбінованого» методу практичного дослідження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території при нетехнічному обстеженні. Його використання передбачає виконання наступних процедур: збір прямих та непрямих доказів наявності вибухонебезпечних предметів, перевірка доказів, які були отримані в ході аналітичного дослідження, формування отриманих результатів нетехнічного обстеження імовірно забрудненої території в 3-D візуалізацію з визначенням точних географічних координат локальних та загальних зон небезпечної території. Особливістю запропонованого методу полягає у вдосконаленні наявного механізму збору непрямих доказів.

3. Перевірено ефективність запропонованого «комбінованого» методу практичного дослідження імовірно забрудненої вибухонебезпечними предметами території, стало очевидно, що даний метод на етапі нетехнічного обстеження дозволяє не тільки скоротить час проведення нетехнічного обстеження, але і створює можливість зменшити ризик травмування особового складу піротехнічних підрозділів за рахунок відсутності фізичного контакту попередніх з імовірно забрудненою територією. Про що свідчить математичне підтвердження, де при використанні наявного методу із заданими параметрами час проведення етапу нетехнічного обстеження складе 20 год 56 хв, а при «комбінованому» методі 5 год 21 хв, що в 3,9 разів покращує результат.

Література

1. IMAS 08.10. Non-technicals survey of the territory. Firstedition, 2019. URL: https://www.mineactionstandards.org/standards/07-11/

2. СОП 08.10 ДСНС. Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту нетехнічного обстеження територій, імовірно забруднених вибухонебезпечними предметами. Затверджено наказом ДСНС України від 08.02.2017 року № 81 URL: https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/9/6/1/xT3qhVpB4aVBVdPMFL73JOFwlaOgumsmm0N0z96I.pdf

3. J. Killeen, L. Jaupi B. Barrett. Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2022. Vol. 27. P. 54–80. doi: 10.1016/j.rsase.2022.100766

4. I. Makki, R. Younes, C. Francis, T. Bianchi, M. Zucchetti. A survey of landmine detection using hyperspectral imaging. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2017. Vol. 124. P. 40–53. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.009

5. S. Kaya, U. M. Leloglu. Buried and surface mine detection from thermal image time series. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017. Vol. 10(10). P. 4544–4552. doi: 10.1109/jstars.2016.2639037

6. O. Csillik. Fast segmentation and classification of very high-resolution remote sensing data using SLIC superpixels. Department of Geoinformatics Z_GIS, University of Salzburg, Austria. 2017. Vol. 9(3). P. 243. doi: 10.3390/rs9030243

7. M. Hussain, D. Chen, A. Cheng, H. Wei, D. Stanley. Change detection from remotely sensed images: from pixel-based to object-based approaches. ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens. 2013. Vol. 80. P. 91–106. doi: 10.1016/ j.isprsjprs.2013.03.006

8. S. Battersby. The unicorn of map projections. International Journal of Cartography, Cartographers Write About Cartography. 2021. Vol 7. № 2. P. 146–151. doi: 10.1080/23729333.2021.1911593

9. Y. Hou, R. Volk, M. Chen, L. Soibelman. Fusing tie points RGB and thermal information for mapping large areas based on aerial images: A study of fusion performance under different flight configurations and experimental conditions. Automation in Construction. 2021. Vol. 124. P. 121–129. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103554

10. L. M. García-Moreno, J. P. Díaz-Paz, H. Loaiza-Correa, A. D. Restrepo-Girón. Dataset of thermal and visible aerial images for multi-modal and multi-spectral image registration and fusion. Data in Brief. 2020. Vol. 29. P. 99–107. doi: 10.1016/j. dib.2020.105326

V. Matukhno*[1]*, *PhD, Deputy Head of Department*
Ye. Morshch*[2]*, *DSc, Chief Inspector*
R. Kornienko*[1]*, *PhD, Researcher of the Department*
S. Vavreniuk*[1]*, *DSc, Professor of the Department*
[1]*National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*
[2]*Department of Emergency Prevention of the SES, Kyiv, Ukraine*

REDUCING THE TIME OF NON-TECHNICAL INSPECTION OF AN TERRITORY POSSIBLY CONTAMINATED WITH EXPLOSIVE OBJECTS

A “combined” method of practical research has been developed as part of a non-technical survey of a territory likely contaminated with explosive objects, which will reduce the time of such survey and reduce the risk of injury to personnel of pyrotechnic units due to the absence of physical contact of personnel with the likely contaminated territory. A mathematical model of a “combined” method for practical research of a supposedly contaminated territory with explosive objects during non-technical inspection has been developed. The mathematical model was obtained from the results of collecting indirect evidence, where the status of an explosive object is not determined. A control algorithm for implementing the “combined” proposed method has been developed, which takes into account the area of the suspicious dangerous territory, which is examined by one non-technical survey group based on the collection of direct and indirect evidence. In addition, when constructing the algorithm, indicators such as the number of groups, the level and type of their equipment were taken into account. The algorithm consists of 12 blocks located at 7 hierarchical levels and connected by direct and feedback connections. When determining the area to be cleared of explosive objects, the area of the territory that has received confirmation of the status of a dangerous zone and the area of the territory of a confirmed dangerous zone are taken into account when checking indirect evidence of a possibly contaminated territory by excluding this territory from the total area of a possibly contaminated territory. The implementation of the proposed method (due to visualization of the area in a 3-D projection with the determination of the exact geographical coordinates of local and general zones of the dangerous territory) will reduce the time of non-technical inspection by 3.9 times, as well as reduce the time of complete demining and clearing land from explosive objects, increase the level of security for civilians in cleared areas.

Keywords: explosive object, dangerous territory, humanitarian demining, pyrotechnic units, non-technical inspection

References

1. IMAS 08.10. (2019). Non-technical survey of the territory. First edition. Avail-

© В. В. Матухно, Є. В. Морщ, Р. В. Корнієнко, С. А. Вавренюк

able at: https://www.mineactionstandards.org/standards/07-11/

2. SOP 08.10/SES. The procedure for carrying out non-technical inspection of territories allegedly contaminated by explosive objects by civil defense bodies and units. Approved by order SES of Ukraine from 08.02.2017. № 81. Available at: https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/9/6/1/xT3qhVpB4aVBVdPMFL73JOFwlaOgumsmm0N0z96I.pdf

3. Killeen, J., Jaupi, L., Barrett, B. (2022). Impact assessment of humanitarian demining using object-based peri-urban land cover classification and morphological building detection from VHR Worldview imagery. Remote Sensing Applications: Society and Environment, (27), 54–80. doi: 10.1016/j.rsase.2022.100766

4. Makki, I., Younes, R., Francis, C., Bianchi, T., Zucchetti, M. (2017). A survey of landmine detection using hyperspectral imaging. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (124), 40–53. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.12.009

5. Kaya, S., Leloglu, U. M. (2017). Buried and surface mine detection from thermal image time series. Institute of Electrical and Electronics Engineers. (10(10)). 4544–4552. doi: 10.1109/jstars.2016.2639037

6. Csillik, O. (2017). Fast segmentation and classification of very high-resolution remote sensing data using SLIC superpixels. Department of Geoinformatics Z_GIS, University of Salzburg, Austria, (9(3)), 243. doi: 10.3390/rs9030243

7. Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D. (2013). Change detection from remotely sensed images: from pixel-based to object-based approaches. ISPRS J. Photogrammetry Remote Sens, (80), 91–106. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.03.006

8. Battersby, S. (2021). The unicorn of map projections. International Journal of Cartography, Cartographers Write About Cartography, (7(2)), 146–151. doi: 10.1080/23729333.2021.1911593

9. Hou, Y., Volk, R., Chen, M., Soibelman, L. (2021). Fusing tie points RGB and thermal information for mapping large areas based on aerial images: A study of fusion performance under different flight configurations and experimental conditions, (124), 121–129. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103554

10. García-Moreno, L. M., Díaz-Paz, J. P., Loaiza-Correa, H., Restrepo-Girón, A. D. (2020). Dataset of thermal and visible aerial images for multi-modal and multi-spectral image registration and fusion. Data in Brief, (29), 99–107. doi: 10.1016/j.dib.2020.105326

Надійшла до редколегії: 20.09.2023
Прийнята до друку: 06.11.2023

УДК 621.03

Б. Б. Поспєлов, *д.т.н., професор, провідн. н.с. (ORCID 0000-0002-0957-3839)*
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)*
А. С. Мельниченко, *PhD, ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-7229-6926)*
М. О. Самойлов, *викл. каф. (ORCID 0000-0002-8924-7944)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

БІКОГЕРЕНТНІСТЬ ДИНАМІКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ЗАГОРЯННЯХ МАТЕРІАЛІВ

Об’єктом дослідження є бікогерентність динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загораннях матеріалів у приміщеннях. Частина проблеми, що вирішувалась, полягає у виявленні особливостей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища при відсутності та появі загорянь в приміщеннях. Результати досліджень свідчать про те, що характер динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища за відсутності та наявності загоряння матеріалів суттєво відрізняється від розподілу Гауса. Встановлено, що бікогерентність на відміну від традиційного спектра динаміки небезпечних параметрів газового середовища, володіє значно більшими інформаційними особливостями та може бути використана для раннього виявлення загорянь. Встановлено, що інформаційними особливостями бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища є конфігурація, число та положення обмежених областей, що відповідають повній когерентності або повної протилежної когерентності, а також типу частотних триплетів, що є характерними для таких обмежених областей. Крім того особливістю бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища є також наявність великих областей з характерними близькими до нульового рівня запропонованої міри бікогерентності. Наявність таких областей в діаграмах бікогерентності свідчить про втрату когерентності для відповідної множини триплетів. За результатами експерименту встановлено, що така особливість бікогерентності характерна для динаміки чадного газу при загорянні спирту та деревини, а також для динаміки температури при загорянні спирту, паперу та текстилю. На практиці новизна та оригінальність отриманих результатів дослідження, пов’язана з можливістю використання бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища для виявлення загорянь з метою недопущення пожеж в приміщеннях.

Ключові слова: загоряння матеріалів, газове середовище приміщень, небезпечні параметри пожежі, бікогерентність, динаміка небезпечних параметрів

1. Вступ

Безпечне функціонування різноманітних об’єктів є одним із важливих завдань для будь-якої держави [1]. Небезпека функціонування об’єктів виникає у випадку появи різного роду небезпечних подій [2]. Небезпечні події є характерними для більшості об’єктів технічної, екологічної та соціальної сфери [3, 4]. Найбільш поширеною небезпечною подією, що виникає на об’єктах, є пожежа в приміщенні (ПП) [5]. Зазвичай пожежа спричиняє значну шкоду людині [6, 7], об’єктам [8] та навколишньому середовищу [9, 10]. Тому головним у безпечному функціонуванні об’єктів в першу чергу є недопущення ПП. У зв’язку з цим запобігання виникненню ПП об’єктів є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку країн світу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У роботі [11] відмічається, що небезпечне функціонування об’єктів слід пов’язувати з недопущенням ПП за рахунок раннього виявлення загорянь в приміщеннях. При цьому в [12] акцент робиться на важливості для раннього виявлення загорянь урахування особливостей динаміки небезпечних параметрів газового середо-

© Б. Б. Поспєлов, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла, О. А. Ященко та ін.

вища (ГС) приміщень при появі загорянь. Такі особливості динаміки небезпечних параметрів ГС обмежуються дослідженнями тільки в часовій області [12]. Частотна область для цього не використовувалася. Наприклад, відома адаптивна технологія [13] обмежуються лише урахуванням особливостей динаміки енергетичних характеристик небезпечних параметрів в часовій області. Крім того передові технології, що реалізовані в стандартах EN і ISO [14–16] також обмежуються тільки часовою областю. Дослідженню динаміки швидкості виділення тепла за різної інтенсивності горіння деревини присвячена робота [17]. Однак у [17] дослідження обмежуються лише середньою часовою динамікою швидкістю виділення тепла в залежності від середньої інтенсивності горіння. Аналогічні дослідження для органічного скла та кипарису виконані в [18]. При цьому в [17, 18] відсутні дослідження спектральних особливостей другого та третього порядку щодо динаміки небезпечних параметрів ГС при горінні матеріалів. Різноманіття та складність реальних умов у приміщеннях потребують для виявлення особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС застосування нових підходів. У зв'язку з цим актуальними стають дослідження особливостей динаміки небезпечних параметрів ГС на основі сучасних технологій в частотній та часовій областях. Наприклад, у роботах [19–22] досліджуються нові технології виявлення ранніх загорянь, які використовують різні показники фрактальності небезпечних параметрів ГС приміщень. Так у роботі [19] використовується кореляційна розмірність щодо вектору стану небезпечних параметрів ГС. Застосування для виявлення ранніх загорянь рекурентних діаграм для динаміки концентрації чадного газу у приміщеннях розглядається в [20]. Міри рекурентності вектора стану ГС щодо короткострокового прогнозу ПП розглядається у [21]. Модифікована модель Брауна для прогнозування ПП описується у [22]. Технологія використання адаптивних рекурентних діаграми розглянута в [23]. Застосування технології рекурентних діаграм для оперативного виявлення небезпечних станів ГС наведено у [24]. Розвиток традиційної кореляційної технології оперативного виявлення рекурентних станів ГС розглянуто у [25]. Застосування методу структури для виявлення небезпечних станів ГС розглянуто в [26]. Однак результати досліджень, що представлені в [19–26], обмежуються розглядом лише часової області. При цьому важливі для виявлення ранніх загорянь особливості поточної динаміки небезпечних параметрів ГС при загораннях у спектральній області в наведених роботах не досліджуються. В роботі [27] вперше досліджуються миттєві амплітудні та фазові частотні спектри динаміки небезпечних параметрів ГС приміщень при загораннях. Зазначається, що миттєві амплітудні частотні спектри виявляються малоінформативними для виявлення ранніх загорянь. Слід зазначити, що такий висновок в [27] зроблено на основі результатів амплітудних частотних спектрів другого порядку, які не враховують спектральний зв'язок між іншими частотними складовими, що є характерними для нелінійних перетворень. Амплітудні та фазові біспектри, що здатні виявляти нелінійні перетворення в [27] не досліджуються. Результати дослідження взаємних зв'язків між поточними значеннями небезпечних параметрів ГС при загораннях наведено у [28]. Однак представлені результати обмежуються лише кореляційними зв'язками в часовий області, що дозволяють виявляти тільки лінійний тип зв'язку. Спектральні характеристики порядку вище другого, що дозволяють виявляти інші типи зв'язків, при цьому не розглядаються та не досліджуються.

Таким чином, виконаний аналіз свідчить про те, що недостатньо дослідженими є особливості динаміки небезпечних параметрів ГС при загораннях у приміщеннях у частотній області у вигляді спектрів вищого порядку. По-перше це стосується дослідження фазових спектрів третього порядку – бікогерентності. У

зв'язку з цим важливою та невирішеною частиною проблеми, що розглядається, є дослідження особливостей бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів ГС при загораннях у приміщеннях.

3. Мета та завдання дослідження

Мета роботи – виконати дослідження особливостей бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища при загораннях у приміщеннях, які дозволять використовувати виявлені особливості бікогерентності для раннього виявлення загорянь та подальшого попередження виникнення пожеж у приміщеннях.

Для досягнення мети роботи поставлено завдання:

– обґрунтувати методику визначення бікогерентності динаміки для довільного небезпечного параметра газового середовища, що спостерігається на довільному фіксованому інтервалі часу;

– виявити особливості бікогерентності експериментальної динаміки для небезпечних параметрів газового середовища на інтервалах відсутності та появи загоряння тестових матеріалів у лабораторній камері.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є бікогерентність динаміки небезпечних параметрів ГС при загораннях матеріалів. Робоча гіпотеза полягає у відмінностей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС при загораннях. Виявлення таких відмінностей дозволить їх використання для виявлення появи З, які є джерелами ПП. Прийняті припущення та спрощення визначаються в тому, що динаміка небезпечних параметрів ГС при загораннях у приміщеннях та у лабораторній камері подібна [29]. Лабораторна камера дозволяє відтворювати експериментальну динаміку небезпечних параметрів ГС подібну стельовій ділянці у негерметичних приміщеннях при загораннях. В якості тестових матеріалів загоряння використовувалися спирт, папір, деревина та текстиль. У якості небезпечних параметрів ГС в камері розглядались температура, щільність диму та концентрація чадного газу (ЧГ). Вимірювання температури проводилися тепловим датчиком ТПТ-4 (Україна), щільності диму – оптичним датчиком диму ДИП-3.2 (Україна) та концентрації ЧГ – датчиком Discovery (Швейцарія). Результати вимірювань датчиками зберігалися в пам'яті комп'ютера. Спеціальне програмне забезпечення дозволяло опитувати датчики з довільним інтервалом часу. Однак у експерименті опитування відповідних датчиків здійснювалось дискретно з інтервалом 0,1 с. При цьому примусовий підпал тестових матеріалів проводився в дискретний момент 230, що відповідає 23 секунді з початку вимірювання. Дослідження особливостей бікогерентності динаміки вимірюваних небезпечних параметрів ГС в камері виконувалося для двох однакових за тривалістю інтервалів часу, що визначалися 10 с. Перший інтервал вибирався у проміжку між 100-м та 200-м дискретними вимірами та відповідав достовірній відсутності загоряння. Другий інтервал вибирався в проміжку між 200-м та 300-м дискретними вимірами та охоплював момент часу примусового підпалу (початку загоряння) відповідного матеріалу. Дослідження проводилося послідовно для кожного з тестових матеріалів: спирт, папір, деревина та текстиль. Для відновлення початкового стану ГС камери перед кожним підпалом тестового матеріалу призволилась природна вентиляція камери протягом 5 хвилин.

© Б. Б. Поспєлов, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла, О. А. Ященко та ін.

5. Результати дослідження бікогерентності динаміки небезпечних параметрів газового середовища при загорянні

5.1. Обґрунтування методики визначення бікогерентності динаміки довільного небезпечного параметра газового середовища

Біспектри є одним із відносно нових інструментів виявлення та ідентифікації нелінійних властивостей різних процесів [30]. Наприклад, застосування біспектру для виявлення загорянь електрообладнання розглядається у [31]. Зазначається, що виявленню загорянь електрообладнання перешкоджає наявність випадкових шумів з розподілом гаусу, які важко усунути як перешкоду. У [32] наголошується, що біспектр є потужним інструментом виявлення особливостей процесів, які відрізняються від гаусу. Біспектри надають більше корисної інформації у порівнянні з класичним спектром потужності. Оцінка B(f 1, f 2) біспектру, слідуючи [33], визначатиметься як

$$B(f1, f2; T) = X(f1; T)X(f2; T)X^{*}(f1 + f2; T), \quad (1)$$

де B(f 1, f 2;T) – функція змінних f 1 та f 2, що мають сенс відповідних частотних індексів; $X(f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)\exp(-j2\pi fk / N)$, (0≤k≤N–1) – перетворення Фур'є для довільного частотного індексу f (0 ≤ f ≤ N–1) та заданої дискретної множини {x(k)} значень досліджуваного небезпечного параметру ГС; * – оператор комплексного сполучення. При цьому довільному частотному індексу f відповідає величина частоти f/T Гц, де величина T визначається інтервалом щодо заданої дискретної множини {x(k)} в секундах. Оцінка біспектру, що визначається (1), є комплексною величиною. Це означає, що замість (1) можна розглядати відповідні оцінки дійсної Re[B(f 1, f 2;T)] та мнимої Im[B(f 1, f 2;T)] частини біспектру. Для дослідження бікогерентності динаміки для вільного небезпечного параметра ГС на довільному інтервалі тривалістю T пропонується використовувати оцінку φ(f 1, f 2;T) бікогерентності, яка визначається у вигляді:

$$\varphi(f1, f2; T) = \operatorname{arctg}\{\operatorname{Im}[B(f1, f2; T)] / \operatorname{Re}[B(f1, f2; T)]\}. \quad (2)$$

Оцінка (2) є незручною для подальшого дослідження. Тому пропонується бікогерентність (2) оцінювати величиною

$$Cbis2(f1, f2; T) = \cos[\varphi(f1, f2; T)]. \quad (3)$$

Відповідно до (3) оцінка бікогерентності Cbis2(f 1, f 2; T) на довільному інтервалі тривалістю T задовольняє нерівність –1≤ Cbis2(f 1, f 2; T) ≤1. Це означає, що значення оцінки (3), які дорівнюють одиниці, визначають повну когерентність, а які дорівнюють мінус одиниці – повну протилежну когерентність відповідних частотних складових. При цьому значення оцінки (3), що дорівнюють нулю будуть визначати відсутність когерентності для відповідних частотних складових. Проміжні значення оцінки (3) будуть визначати різний рівень когерентності для відповідних частотних складових. Слід зауважити, що точність оцінки (3) визначається точністю оцінки спектру X(f), яка залежить від тривалості інтервалу дискретної множини {x(k)}. Згідно [34], зі збільшенням цієї тривалості точність оцінки спектру X(f) зростає. У роботах [35, 36] показано, що в загальному випадку для великих значень N оцінки реальної та мнимої частин біспектру (1) виявляються асимптотичні незміщеними та заможними.

Таким чином, запропонована оцінка (3) дозволяє досліджувати особливості бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС на інтервалах відсутності та наявності загорянь. Це дозволяє досягти основної поставленої мети дослідження.

5.2. Оцінка амплітудних біспектрів динаміки параметрів газового середовища при загорянні матеріалів

Дослідження виконувалось на основі аналізу позитивних значень оцінки (2), на основі обчислення оцінки (3) на інтервалах достовірної відсутності та появі загорянння тестових матеріалів у лабораторній камері. На рис. 1 наведено діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки концентрації чадного газу ГС у камері на інтервалах відсутності та появі загорянь для відповідних тестових матеріалів.

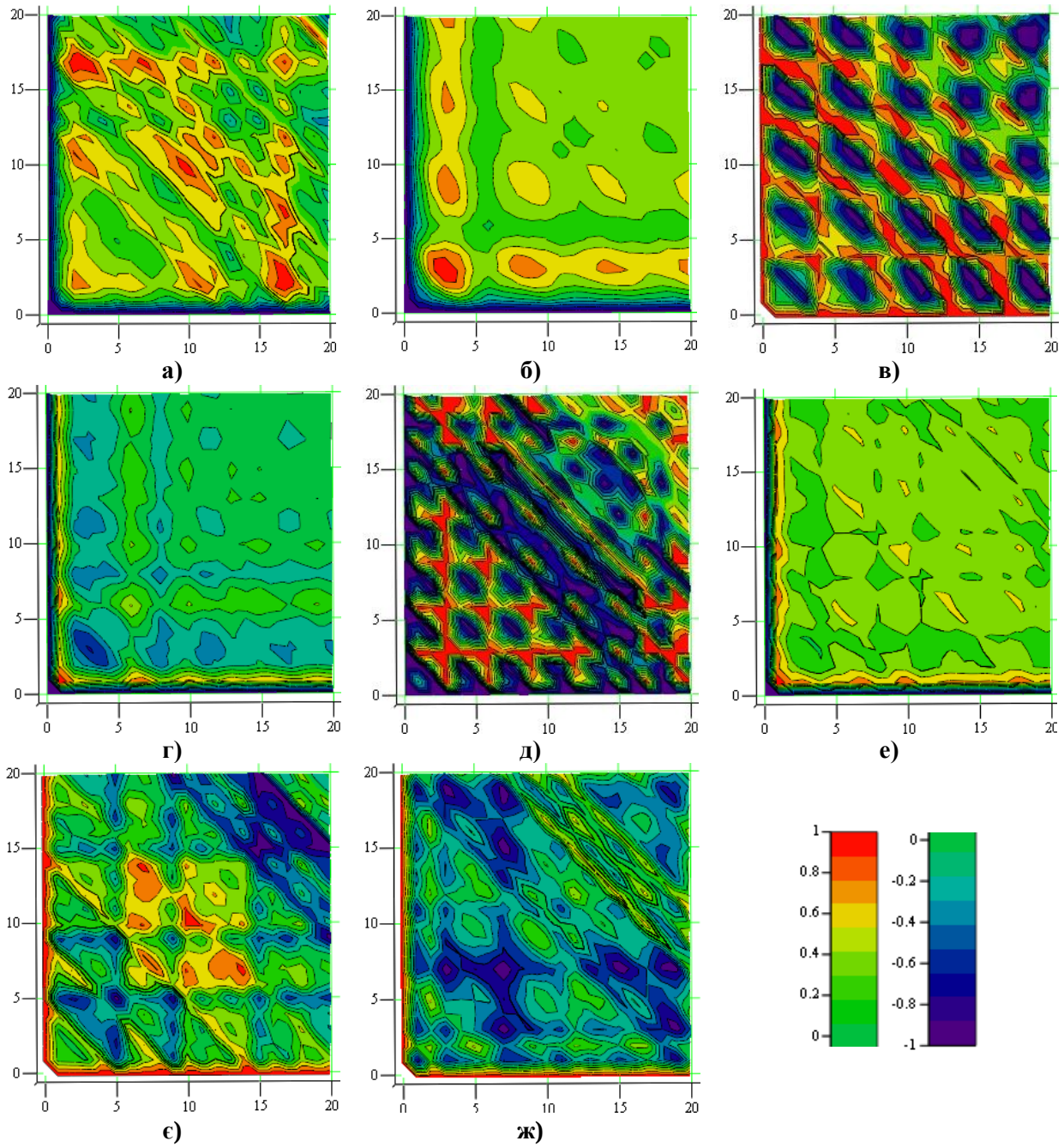


Рис. 1. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки концентрації чадного газу в газовому середовищі камери на інтервалах відсутності та появі загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, є – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

© Б. Б. Поспєлов, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла, О. А. Ященко та ін.

Аналогічні діаграми бікогерентності динаміки щільності диму ГС у лабораторній камері на інтервалах відсутності та появи загоряння тестових матеріалів наведено на рис. 2.

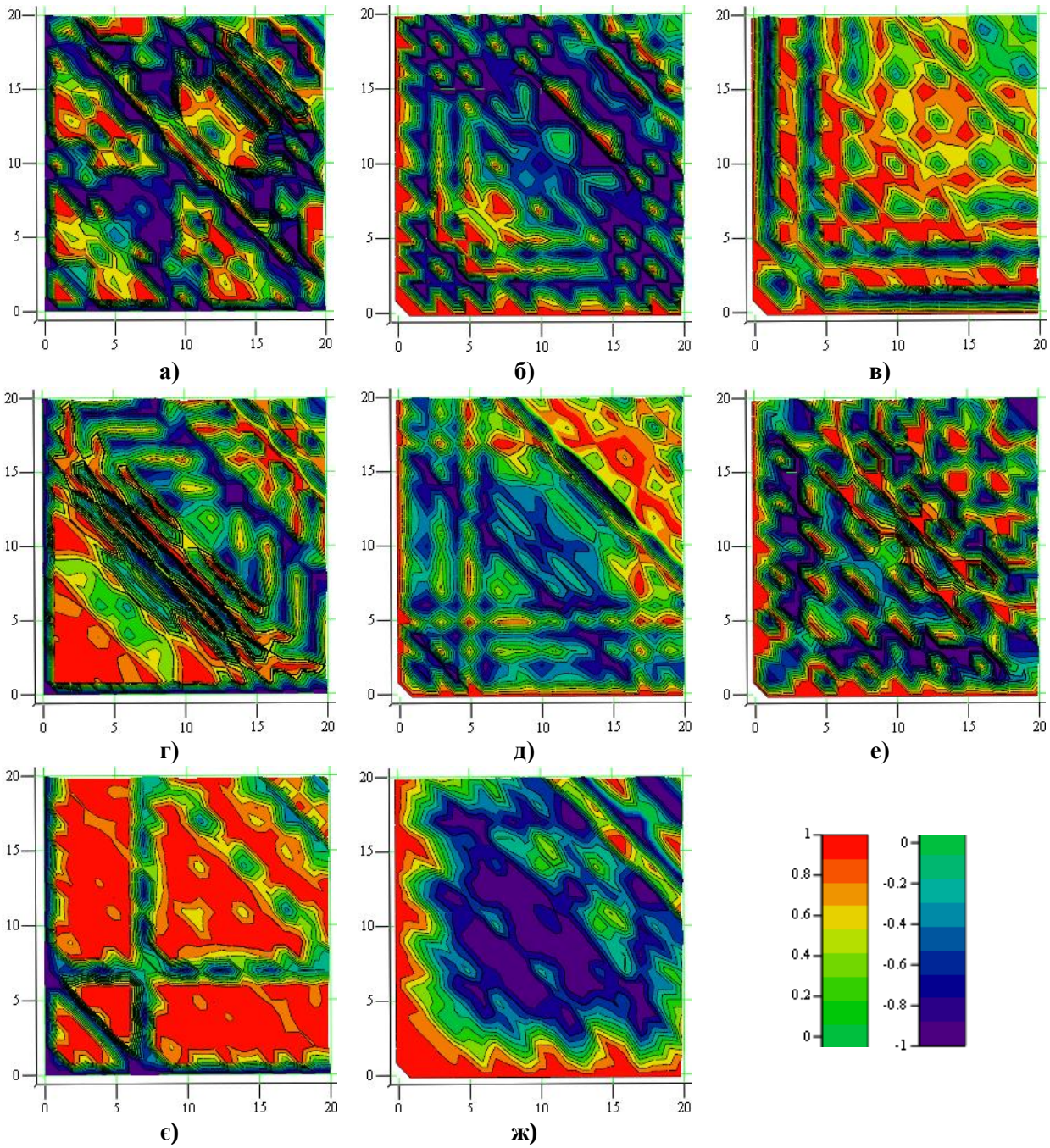


Рис. 2. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки щільності диму в газовому середовищі лабораторної камери на інтервалах відсутності та появі загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, є – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

Діаграми бікогерентності динаміки температури ГС у камері на інтервалах відсутності та появи загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю наведено на рис. 3.

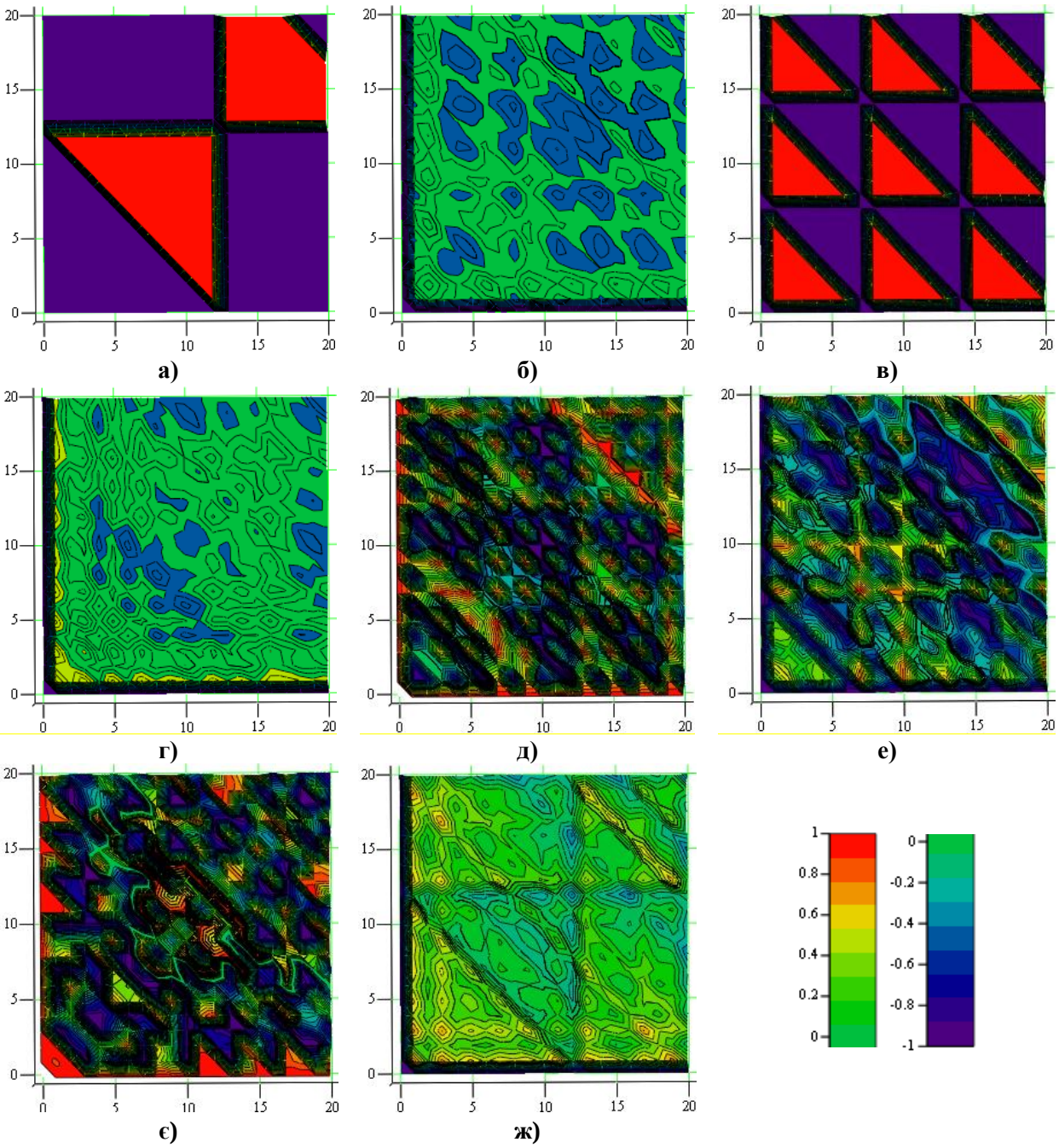


Рис. 3. Діаграми однакових рівнів бікогерентності динаміки температури газового середовища в лабораторній камері на інтервалах відсутності та появі загорянь для відповідних тестових матеріалів: а, в, д, є – відсутність загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно; б, г, е, ж – поява загоряння спирту, паперу, деревини та текстилю відповідно

Таким чином, наведені на рис. 1–3 експериментальні діаграми бікогерентності, ілюструють особливості динаміки концентрації чадного газу, щільності диму та температури ГС в камері на інтервалах відсутності та появи загорянь тестових матеріалів у вигляді спирту, паперу, деревини та текстилю, які є характерними для більшості типів приміщень об’єктів.

6. Обговорення результатів дослідження бікогерентності динаміки небезпечних параметрів середовища при загораннях

Із діаграм на рис. 1–3 слідує, що динаміка концентрації чадного газу, щільності диму та температури ГС у лабораторній камері на інтервалах відсутності та появи

© Б. Б. Поспєлов, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла, О. А. Ященко та ін.

загоряння тестових матеріалів є нелінійною. Тому усі відомі результати, що одержані в припущенні лінійності динаміки небезпечних параметрів ГС, є дуже грубими. Крім того припущення щодо лінійності зміни небезпечних параметрів ГС на початку загоряння матеріалів є також не дійсним. Це означає, що всі моделі прогнозування пожеж в розглянутому сенсі є помилковими. З урахуванням цього потрібна суттєва корекція відповідних стандартів в сфері пожежної безпеки приміщень та систем пожежної автоматики. Одержані результати свідчать також про те, що різні матеріали неоднаково впливають на динаміку бікогерентності небезпечних параметрів ГС. Конфігурація, число та положення областей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС, що мають червоний колір характеризують наявність когерентності між довільною парою частотних складових, що визначаються частотними індексами f 1 і f 2, та третьою частотою, яка відповідає частотному індексу f 1+f 2. Такий набір трьох частот, що відповідає трьом частотним індексам f 1, f 2 та f 1+f 2 прийнято називати триплетом. Тому динаміка небезпечних параметрів ГС, як до так і після загоряння матеріалів характеризується особливостями конфігурації, числом та положенням областей, що відповідають різним триплетам (червоний колір діаграм на рис. 1–3). Важливими областями наведених діаграм є також конфігурація, число та положення областей, що мають фіолетовий колір. Для таких областей має місце протилежна когерентність відповідних триплетів. Це означає, що особливостями бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС слід вважати конфігурацію, число та положення областей на діаграмах, що мають червоний та фіолетовий колір. Крім того до особливостей бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС можна віднести також її загальний рівень (наявність великих областей, що мають зелений колір). Для областей, що мають зелений колір, характерна втрата когерентності для відповідних триплетів. Наприклад, це характерно для динаміки чадного газу при загорянні спирту (рис. 1 б) та деревини (рис. 1 е). Зелений колір характерний також для бікогерентності динаміки температури при загорянні спирту (рис. 3 б), паперу (рис. 3 г) та текстилю (рис. 3 з).

Таким чином, встановлені особливості бікогерентності динаміки досліджуваних небезпечних параметрів ГС в лабораторній камері при загорянні тестових матеріалів можуть бути використані для виявлення ранніх загорянь та попередження виникнення пожежі в приміщеннях об’єктів. Одержані результати експериментальних досліджень свідчать, що статистика динаміки небезпечних параметрів ГС в камері на інтервалах відсутності та наявності загорянь тестових матеріалів відрізняється від гауса. Це означає, що ефективне виявлення небезпечних змін у динаміці небезпечних параметрів ГС, що спричиняються загораннями матеріалів, потребує використання бікогерентності. Однак використання бікогерентності для фіксованого інтервалу вимірювань не дозволяють отримати інформацію саме про момент часу виникнення загоряння, що є важливим практичним показником виявлення ранніх загорянь. При цьому момент загоряння на основі бікогерентності буде визначатися лише з точністю часового положення вимірюваного інтервалу часу. Крім того точність обчислення бікогерентності залежатиме переважно від тривалості інтервалу та частоти дискретизації вимірювань. Чим більша тривалість цього інтервалу, тим точніше обчислення спектру Фур’є та бікогерентності динаміки небезпечного параметра ГС. У дослідженні інтервал вимірювання визначався 100 дискретними значеннями небезпечного параметра з інтервалом 0,1 секунда. Це означає, що тривалість інтервалу спостереження дорівнювала 10 секундам. Тому наведені результати дозволяють виявляти момент загоряння лише з точністю, що визначається даним інтервалом спо-

стереження. Для цього інтервалу роздільна частотна здатність становить 0,1 Гц. Перевага дослідження полягає в новизні та оригінальності результатів, пов'язаних з використанням бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС та можливості їх використання для виявлення ранніх загорянь з метою недопущення ПП. До обмежень дослідження можна віднести те, що результати одержані на основі експериментальних вимірів динаміки небезпечних параметрів ГС у лабораторній камері. Вони не є остаточними, а лише вказують головний напрямок та перспективність їх подальшого розвитку. Разом з тим отримані результати потребують додаткової перевірки вогневими випробуваннями в реальних умовах.

7. Висновки

1. Обґрунтовано методику визначення бікогерентності динаміки для довільного небезпечного параметра газового середовища, що спостерігається на вільному фіксованому інтервалі часу. Дана методика відрізняється більшою практичною зручністю щодо дослідження особливостей бікогерентності динаміки небезпечного параметра газового середовища. Це стало можливим завдяки обчисленню замість самої бікогерентності косинуса від неї. При цьому всі рівні досліджуваної бікогерентності обмежуються значеннями від одиниці до мінус одиниці. Така методика дозволяє досліджувати особливості взаємозв'язків між довільними частотними триплетами у спектрі динаміки небезпечних параметрів газового середовища для довільних інтервалів на основі аналізу відповідних діаграм бікогерентності в обмеженому інтервалі значень між одиницею та мінус одиницею при загораннях різних типів матеріалів у приміщеннях об'єктів.

2. Досліджено особливості бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища на прикладі загоряння тестових матеріалів у лабораторній камері. Результати досліджень свідчать про те, що характер динаміки досліджуваних небезпечних параметрів газового середовища за відсутності та наявності загоряння матеріалів суттєво відрізняється від розподілу гауса. Встановлено, що бікогерентність на відміну від традиційного спектра динаміки небезпечних параметрів газового середовища, володіє значно більшими інформаційними особливостями, що можуть бути використаними для надійного раннього виявлення загорянь у приміщеннях. Встановлено, що інформаційними особливостями бікогерентності динаміки основних небезпечних параметрів газового середовища є конфігурація, число та положення областей, що відповідають повній когерентності або повній протилежній когерентності, а також типу частотних триплетів, що є характерними до таких областей. Крім того особливістю бікогерентності динаміки небезпечних параметрів ГС є також наявність великих областей з характерними до близьких до нульових рівнів. Наявність таких областей в діаграмах бікогерентності свідчить про втрату когерентності для відповідної множини триплетів. За результатами експерименту встановлено, що така особливість бікогерентності характерна для динаміки чадного газу при загорянні спирту та деревини, а також для динаміки температури при загорянні спирту, паперу та текстилю.

Литература

1. Vambol S., Vambol V., Bogdanov I., Suchikova Y., Rashkevich N. Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6/10(90). P. 57–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118213

2. Andronov V., Pospelov B., Rybka E., Skliarov S. Examining the learning fire detectors under real conditions of application. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3/9(87). P. 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101985

3. Mygalenko K., Nuyanzin V., Zemlianskyi A., Dominik A., Pozdieiev S. Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1/10(91). P. 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

4. 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. 11. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11

5. Kovalov A., Otrosh Y., Ostroverkh O., Hrushovinchuk O., Savchenko O. Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 60. № 00003. doi: 10.1051/e3sconf/20186000003

6. Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association. 2020. 11 p. URL: www.nfpa.org

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER. 2021. 180 p. doi: 10.15587/978-617-7319-43-5

12. 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

13. 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

14. BS EN 54-30:2015 Fire detection and fire alarm systems. Part 30: Multisensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors. doi: 10.3403/30266860u

15. BS EN 54-31:2014 Fire detection and fire alarm system. – Part 31: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors. URL: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6d78459f-6378-4845-bf94-3e52a88692df/en-54-31-2014

16. ISO 7240-8:2014 Fire detection and alarm systems – Part 8: Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor.

17. 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.

18. Peng X., Liu S., Lu G. Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. Journal of Chongqing University. 2005. № 28. P. 122.

19. 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

20. 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

21. 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

22. 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

23. 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

24. Pospelov B., Rybka E., Meleshchenko R., Borodych P., Gornostal S. Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 1/10 (97). P. 29–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

25. 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

26. Sadkovyi V., Pospelov B., Andronov V., Rybka E., Krainiukov O., Rud A., Karpets K., Bezuhla Yu. 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 Technologies. 2020. Vol.6/10 (108). P. 14–22. doi: 10.15587/1729-4061.2020.218714

27. 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

28. 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.

29. Полстянкин Р. М. Стохастические модели опасных факторов и параметров очага загорания в помещениях. Проблемы пожарной безопасности. 2015. Вып. 38. С. 130–135. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ppb_2015_38_24

30. Saeed M., Alfatih S. Nonlinearity detection in hydraulic machines utilizing bispectral analysis. TJ Mechanical engineering and machinery. 2013. P. 13–21.

31. Yang K., Zhang R., Chen S., Zhang F., Yang J., Zhang X. Series arc fault detection algorithm based on autoregressive bispectrum analysis. Algorithms. 2015. Vol. 8. P. 929–950. doi: 10.3390/a8040929

32. 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

33. 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

34. Max J. Principes generaus et methods classiques. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro. 1981. P. 311.

35. 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

36. Nikias C. L., Raghuveer M. R. Bispectral Estimation: a Digital Signal Processing Framework. Proc. IEEE. 1987. Vol. 75. № 7. P. 869–891. doi: 10.1109/proc.1987.13824

B. Pospelov, *DSc, Professor, Chief Researcher*
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 Department*
A. Melnychenko, *PhD, Senior Lecturer of the Department*
M. Samoilov, *Lecturer of the Department*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

BIHOHERENTITY OF THE DYNAMICS OF DANGEROUS PARAMETERS OF THE GAS ENVIRONMENT DURING IGNITION OF MATERIALS

The object of the study is the bicoherence of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment during the ignition of materials in the premises. Part of the problem that was solved consists in identifying the features of the bicoherence of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment in the absence and occurrence of fires in the premises. The results of the research indicate that the nature of the dynamics of the studied hazardous parameters of the gas environment in the absence and presence of material ignition is significantly different from the Gaussian distribution. It was found that bicoherence, in contrast to the traditional spectrum of the dynamics of dangerous parameters of the gas environment, has significantly greater informational features and can be used for early detection of fires. It was established that the information features of the bicoherence dynamics of the main hazardous parameters of the gas environment are the configuration, number and position of limited areas corresponding to full coherence or full opposite coherence, as well as the type of frequency triplets that are characteristic of such limited areas. In addition, a feature of the bicoherence of the dynamics of hazardous parameters of the gas environment is also the presence of large areas with characteristics close to the zero level of the proposed measure of bicoherence. The presence of such regions in the bicoherence diagrams indicates the loss of coherence for the corresponding

set of triplets. According to the results of the experiment, it was established that this feature of bicoherence is characteristic for the dynamics of carbon monoxide during the ignition of alcohol and wood, as well as for the dynamics of temperature during the ignition of alcohol, paper, and textiles. In practice, the novelty and originality of the obtained research results is related to the possibility of using the bicoherence of the dynamics of dangerous gas environment parameters to detect fires in order to prevent fires in premises.

Keywords: ignition of materials, gaseous environment of premises, dangerous fire parameters, bicoherence, dynamics of dangerous parameters

References

1. Vambol, S., Vambol, V., Bogdanov, I., Suchikova, Y., Rashkevich, N. (2017). Research of the influence of decomposition of wastes of polymers with nano inclusions on the atmosphere. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6/10(90), 57–64. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118213

2. Andronov, V., Pospelov, B., Rybka, E., Skliarov, S. (2017). Examining the learning fire detectors under real conditions of application. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3/9(87), 53–59. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101985

3. Mygalenko, K., Nuyanzin, V., Zemlianskyi, A., Dominik, A., Pozdieiev, S. (2018). Development of the technique for restricting the propagation of fire in natural peat ecosystems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/10(91), 31–37. doi: 10.15587/1729-4061.2018.121727

4. 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

5. Kovalov, A., Otrosh, Y., Ostroverkh, O., Hrushovinchuk, O., Savchenko O. (2018). Fire resistance evaluation of reinforced concrete floors with fire-retardant coating by calculation and experimental method. E3S Web of Conferences, 60, 00003. doi: 10.1051/e3sconf/20186000003

6. (2020). Reproduced with permission from fire loss in the United States during 2019. National Fire Protection Association, 11. Available at: www.nfpa.org

7. 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

8. 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

9. 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

10. 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

11. Sadkovyi, V., Andronov, V., Semkiv, O., Kovalov, A., Rybka, E., Otrosh, Yu. et. al.; Sadkovyi, V., Rybka, E., Otrosh, Yu. (Eds.) (2021). Fire resistance of reinforced concrete and steel structures. Kharkiv: PC TECHNOLOGY CENTER, 180.

 © Б. Б. Поспєлов, Р. Г. Мелещенко, Ю. С. Безугла, О. А. Ященко та ін.

doi: 10.15587/978-617-7319-43-5

12. 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

13. 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

14. BS EN 54-30:2015 Fire detection and fire alarm systems. Part 30: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of carbon monoxide and heat sensors. doi: 10.3403/30266860u

15. BS EN 54-31:2014 Fire detection and fire alarm system. – Part 31: Multi-sensor fire detectors. Point detectors using a combination of smoke, carbon monoxide and optionally heat sensors. Available at: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/6d78459f-6378-4845-bf94-3e52a88692df/en-54-31-2014

16. ISO 7240-8:2014 Fire detection and alarm systems – Part 8: Point-type fire detectors using a carbon monoxide sensor in combination with a heat sensor.

17. 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.

18. Peng, X., Liu, S., Lu, G. (2005). Experimental Analysis on Heat Release Rate of Materials. Journal of Chongqing University, 28, 122.

19. 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

20. 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

21. 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

22. 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

23. 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

24. Pospelov, B., Rybka, E., Meleshchenko, R., Borodych, P., Gornostal, S. (2019). Development of the method for rapid detection of hazardous atmospheric pollution of cities with the help of recurrence measures. Eastern-European Journal of Enter-

prise Technologies, 1/10 (97), 29–35. doi: 10.15587/1729-4061.2019.155027

25. 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

26 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: 15587/1729-4061.2020.218714

27. 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

28. 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.

29. 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

30. Saeed, M., Alfatih, S. (2013). Nonlinearity detection in hydraulic machines utilizing bispectral analysis. TJ Mechanical engineering and machinery, 13–21.

31. 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

32. Yang, B., Wang, M., Zan, T., Gao, X., (2021). Application of bispectrum diagonal slice feature analysis in tool wear states monitoring. Research Square. doi: 10.21203/rs.3.rs-775113/v1

33. 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. V. 21. 1177. doi: 10.3390/s21041177

34. Max, J. (1981). Principes generaus et methods classiques. Tome 1. Paris New York Barselone Milan Mexico Rio de Janeiro, 311.

35. 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

36. Nikias, C. L., Raghuveer, M. R. (1987). Bispectrum estimation: A digital signal processing framework. Proceedings of the IEEE, 75 (7), 869–891. doi: 10.1109/proc.1987.13824

Надійшла до редколегії: 25.09.2023
Прийнята до друку: 06.11.2023

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)*
***Ю. І. Гапоненко*[1]**, *викл. каф. (ORCID 0000-0003-0854-5710)*
***І. К. Кириченко*[2]**, *д.ф-м.н, професор, проф. каф. (ORCID 0000-0001-7375-8275*)
[1]*Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*
[2]*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна*

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ У ПІДВАГОНОМУ ПРОСТОРІ МЕТРО ГЕЛЕУТВОРЮЮЧИМИ СКЛАДАМИ

Підвищено ефективності гасіння пожеж підвагонного простору вагонів на станціях метрополітену за рахунок використання спеціального візка подачі гелеутворюючих складів у важкодоступні місця під вагонами метро. З метою забезпечення подачі гелеутворюючої системи у важкодоступні місця під вагонами метро, запропоновано використовувати спеціальний візок, який рухається всередині основної колії метрополітену в поглибленому лотку водозбірника, завдяки тросової лебідки за принципом «тягни-штовхай» з автономним електричним реверсивним приводом. Для підтвердження ефективності гасіння, на спеціальному стенді, що дозволяв змінювати положення модельного вогнища в просторі, до положення умовної стелі-підлоги було проведено порівняльні експерименти для трьох типів найбільш розповсюджених вогнегасних речовин, з визначенням середніх значень часу та витрати вогнегасних речовин на гасіння пожежі, при різних кутах нахилу їх подавання. Визнано, що використання гелеутворюючих складів, при гасінні елементів обладнання у підвагонному просторі, сприяє скороченню витрат на гасіння та дозволяє в 2,5 рази швидше погасити вогнище під вагоном. Встановлено, що зміна кута нахилу палаючої поверхні суттєво впливає на ефективність гасіння водою та вогнегасним порошком. Отриманні данні підтверджують доцільність створення спеціальних візків для підвагонного гасіння з використанням вогнегасних гелеутворючих складів. Отриманні результати є корисними та важливими, оскільки підтверджують підвищення ефективності гасіння підвагоного простору гелеутворюючими складами, відображають скорочення в рази часу та витрати вогнегасної речовини при використанні гелеутворюючих складів. Використання спеціального візка підвагоного гасіння гелеутворючими складами дозволяє автоматизовано здійснювати дистанційне гасіння у важкодоступних місцях підвагоного простору, що значно підвищує безпеку рятувальників при гасінні таких пожеж.

Ключові слова: вогненна речовина, гелеутворючий склад, вагон метро, візок підвагонного гасіння

1. Вступ

Проблема виникнення надзвичайних ситуацій у підземних спорудах останнім часом набуває гостроти, що зумовлено не скільки зростанням їх кількості, скільки масштабами наслідків таких ситуацій [1]. Перше місце в цьому ряду посідають пожежі, аварії та терористичні акти, що супроводжуються виникненням пожеж і утворенням загазованого середовища [2]. Враховуючи велику кількість людей, які можуть одночасно перебувати в обмеженому просторі споруд метрополітену, а також об’єктивні труднощі проведення рятувальних операцій і дій щодо ліквідації осередків пожеж і аварій, не важко уявити, до яких катастрофічних наслідків вони можуть призвести.

Аналіз інформації про загоряння і пожежі в метрополітенах України та світу [3] за останні роки свідчить про те, що вразливими з точки зору пожежної безпеки слід вважати дерев’яну підлогу вагонів, тягові електричні двигуни (ТЕД), силові й комутаційні кабелі з гумоподібних вуглеводних і полімерних матеріалів, тя-

гові редуктора, що наповнені пожежонебезпечним мастилом та інше. Їх пожежне навантаження, розподілене по підлозі умовно рівномірно та коливається в межах 45–50 кг/м^2, в залежності від типу вагону. Будь-то: модель 81-714(717) чи модель 81-718(719), що експлуатуються в метрополітенах України. Причому, підвагонний простір є практично недоступна локація вказаного пожежного навантаження.

Наявність великої кількості горючих матеріалів у підвагонному просторі вагонів метрополітену становить значну пожежну небезпеку. Виникнення пожежі під вагоном метро як правило супроводжується різким підвищенням температур та щільним задимленням станційних приміщень, перегінних тунелів, що в свою чергу ускладнює евакуацію та рятування пасажирів, обслуговуючого персоналу, вимагає залучення великої кількості сил і засобів пожежно-рятувальних підрозділів, створює значні труднощі в управлінні їх оперативними діями.

Під час гасіння рухомого складу метрополітену особовому складу пожежних підрозділів загрожує: можливість отримання, травм при переміщенні у задимленій атмосфері, ураження електричним струменем, травмування рухомим складом, втрата орієнтації та зв'язку у спорудах, що задимлені, отримання теплового удару внаслідок високої температури середовища.

З урахуванням обставин, що при пожежі в метро струм в контактну мережу не подається, стає можливим говорити про потенційну наявність переваг застосування гелеутворюючих складів (ГУС) для підвагонного гасіння пожеж на станціях метрополітену. Дійсно, сучасні ГУС складаються, в основному, з двох окремо збережених компонент, що можуть роздільно-одночасно подаватися в осередок пожежі. Один з них являє собою розчин гелеутворюючого силікату лужного металу, другий – розчин речовини, який взаємодіючи з силікатами утворює стійкий шар гелю. Вартість таких ГУС, порівняно з вогнегасним порошком, яким знаряджено більшість первинних засобів пожежогасіння у метрополітені, в 3 рази дешевше. До того ж вони мають достатньо стійкі адгезійні властивості, що дозволяють їм шарами надійно прилипати до палаючих поверхонь, тим самим зменшуючи в рази кількість необхідної для гасіння вогнегасної речовини.

При чому однією з переваг гасіння з використанням ГУС – є їх висока вогнезахисна спроможність, яка обумовлена охолоджуючою дією води, що міститься в гелі, яка з часом випаровується. Після випаровування всієї води із гелевої суміші утворюється пористий шар висушеного гелю (ксероргель), який фактично виключає повторне займання горючого матеріалу об'єкта через низьку теплопровідність ксерогелю [4].

Що стосується до порівняння показника вогнегасної здатності ГУС систем та розчинів на основі води слід відмітити наступне. За рахунок адгезійних властивостей ГУС міцно зчіплюються з поверхнею об'єкту, який захищається при пожежогасінні, що суттєве впливає на показник їх вогнегасної спроможності. Дійсно, при гасінні твердих горючих матеріалів цей показник, що визначається співвідношенням маси вогнегасної речовини, яка припадає на одиницю площі модельного вогнища, у ГУС значно нижче, ніж при використанні води. До цього додамо, що вже багато робіт практичного використанням ГУС при пожежогасінні [5, 6] базуються на об'єднанні переваг хіміко-технологічних можливостей ГУС, які пов'язані з «обгортанням» шарами гелю палаючих поверхонь, разом з тактико-технічними особливостями оперативної доставки цього вогнегасного складу до палаючих об'єктів.

Отриманні практичні результати наукових досліджень щодо гасіння підва-

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, Ю. І. Гапоненко та ін.

гонного простору вагонів метрополітену можуть дати суттєве зменшення прямих та побічних збитків від гасіння та підвищити безпеку роботи пожежних при гасінні пожеж у складних умовах метрополітену.

Таким чином, проблема недостатньої ефективності пожежогасіння у важкодоступних місцях під вагонами метро є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На станціях метрополітену та в вагонах метро переважно використовуються порошкові вогнегасники двох типів: у вагонах переносні ВП-5, та на станціях пересувні ВП-50. Ті та інші відносяться до первинних засобів пожежогасіння [7].

В роботі [8] зазначено, що переносними порошковими вогнегасниками ВП-5 розташованими у кожному вагоні, можуть користуватися пасажири при незначних пожежах в салоні вагону. Недоліком використання переносних порошкових вогнегасників ВП-5 є те, що при загораннях елементів підвагонного обладнання очевидно, що їх використання через люки в підлозі вагону в силу обмеженої кількості вогнегасного порошку в них (5 кг) не ефективне.

В роботі [9] визначено, що для гасіння більш значних пожеж, що можуть виникнути й поширюватися де інде на станції, в тому числі і в електропотязі, використовуються пересувні ВП-50. Звісно, що їх застосування напряму пов’язано з прибуттям потягу, в якому виникнула пожежа, до станції, висадкою усіх пасажирів з вагонів та обов’язковою, в усіх випадках пожеж в метро, з відключенням напруги контактної мережі. Основними недоліками є те, що їх застосування потребує багато часу та пов’язано з деякими перешкодами такими як: переміщення по платформі в умовах хаотичної евакуації пасажирів з вагонів та станції, налагодження для подавання у підвагонний простір розпорошеного вогнегасного порошку через люки або через просвіти між вагонами, вагоном і платформою, з безперечним дотриманням правил безпеки праці робітниками станції. В таких умовах пожежогасіння можна здійснювати практично тільки «навмання» – без абиякого моніторингу влучного потрапляння порошку до осередку пожежі, а це не додає впевненості щодо результату локалізації чи ліквідації загоряння в підвагонному просторі електропотягу. Тобто процес гасіння таких пожеж суттєво залежить від людського фактору.

В роботі [10] запропонована аналогічна архаїчна схема гасіння пожеж в підвагонному просторі метро. Тут так само не забезпечується необхідна ефективність пожежогасіння у підвагонному просторі, в силу хибності тактичної схеми гасіння, яка не дозволяє здійснювати більш-менш прицільне подання вогнегасного порошку на елементи обладнання, що горять під вагоном.

В роботі [11] було запропоновано спеціальний двовісний візок підвагонного гасіння пожеж. Тут розв’язати проблему підвагонного гасіння пожежі в метро запропоновано за рахунок того, що два порошкові вогнегасники ВП-50 розміщуються на рамі двовісного візка. Візок знаходиться на напрямному шляху, розташованому всередині основної колії руху вагонів метрополітену між напівшпал в поглибленні лотка водозбірника. Колісні пари спеціального візка своєю рамою приєднані до закільцьованого тросу тягової лебідки, що діє за принципом «тягнитовхай». Система управління рухом візка автономна і забезпечена датчиком температур і датчиком-тахометром, за допомогою яких черговий станції (оператор) контролює режим руху, залежно від факту наближення візка з вогнегасниками до вогнища пожежі у підвагонному просторі. Режим відкривання запірних пристроїв

вогнегасників здійснюється дистанційно радіо сигналами. Вогнегасники із витраченим вогнегасним порошком можуть бути оперативно замінені заповненими при повертанні візка до місця його дислокації. В результаті, ефективність гасіння такою технікою принципово підвищується. Недоліком запропонованого способу підвагонного гасіння пожеж є те, що порошкове гасіння схильне до такого природного явища, як здування та осаджування часток порошку на землю (в даному випадку – на рейко-шпальну решітку), а це знижує об'ємну концентрацію вогнегасної речовини (порошку) під вагоном, що горить. В такому разі процеси горіння підвагонного обладнання можуть не вщухати, внаслідок чого полум'я може безконтрольно поширюватися по вагону і по потягу, а за порівняно малий проміжок часу (10–20 хв.) одиниця рухомого складу вигорає вщент. Для порівняльної оцінки цього небажаного явища підкреслимо, що час роботи одного ВП-50 складає 20 секунд.

В роботі [12] доведено, що силікатні системи $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2{+}CaCl_2$ та $Na_2O{\cdot}2{,}95SiO_2{+}K_2CO_3$ мають гарну адгезію до різноманітних матеріалів, більш високу механічну міцність ніж аналогічні суміші, що спучуються та інші гелі. Більш того гелі що, отриманні з кальцієвими і магнієвими каталізаторами гелеутворення, створюють міцні шари на поверхнях деревини (підлога вагону метро – дерев'яна) та на металевих елементах конструкцій (конструктиви вагону і візків – металеві). Вказані шари мають міцну адгезію до поверхонь з твердих матеріалів та при дії вогню зберігають цілісність. Гель, що створює вогнезахисний шар на поверхні об'єкту пожежогасіння, перешкоджає доступу до нього кисню повітря, припиняючи горіння. Цей шар, за рахунок своїх адгезійних властивостей, надійно закріплюється на похилих і вертикальних поверхнях (навіть на стелі), що в порівнянні та на відміну використання при пожежогасінні порошку значно зменшує втрати, пов'язані з осаджуванням останнього. Але слід зазначити, що дослідження по оцінці ефективності застосування силікатних систем при подачі їх на гасіння знизу вгору, на об'єкти під різними кутами нахилу раніше не проводились. В роботі [13] визначено, що ГУС з амонійними каталізаторами гелеутворення $(NH_4)_2SO_4{+}NH_4H_2PO_4{+}Na_2O{\cdot}2{,}7SiO_2$ та $NH_4H_2PO_4{+}Na_2O{\cdot}2{,}7SiO_2$ при термічній дії, для них характерно розшарування деяких фрагментів покриття та їх звалювання, хоча й після розшарування на поверхні, вона достатньо довго не спалахує. Це мабуть зв'язано з тим, що фосфати амонію насичують верхній шар деревини та за рахунок своїх інгібуючих властивостей стримують спалахи вогню. Однак, ГУС з амонійними каталізаторами гелеутворення створюють менш міцні шари гелю, з невисокою адгезією до твёрдих поверхонь, які при нагріванні значно розтріскуються та можуть зсипатися, як порошок. В роботі [14] вдалось створити мобільну установку пожежогасіння ГУС, яка була встановлена на візку зі спеціальними колесами для здолання різних перешкод (наприклад, сходових маршів). Випробування цієї установки показали високу її дієздатність при гасінні нетрадиційних пожеж, до яких можна віднести пожежі в метрополітенах, де на шляхах руху пожежних-рятувальників існують перешкоди у вигляді шпал і напівшпал в тунелях і на станціях метро. Недоліком запропонованої установки пожежогасіння є її значна вага, необхідність ручного переміщення та значні складнощі щодо доставки її у підвагонний простір метрополітену.

Таким чином невирішеною частиною розглянутої проблеми є недостатня ефективність вогнегасних речовин та недосконаліть пристроїв для їх подачі та застосування у важкодоступні місця під вагонами метро.

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, Ю. І. Гапоненко та ін.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності гасіння пожеж підвагонного простору вагонів на станціях метрополітену за рахунок використання спеціального візка подачі гелеутворюючих складів у важкодоступні місця під вагонами метро.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

– розробити проект технічного засобу щодо подачі у важкодоступні місця підвагонного простору метро гелеутворюючих складів;

– провести експериментальні дослідження щодо гасінні пожеж у підвагонному просторі вагонів метро різними вогнегасними речовинами та визначати, вплив зміні кута нахилу об'єкта пожежогасіння на ефективність гасіння різними вогнегасними речовинами.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є спеціальний візок та його лабораторний аналог пожежогасіння підвагонного обладнання, що розміщено під вагонами у метрополітені.

Предметом дослідження є процес пожежогасіння у підвагонному просторі вагона метро, який складається з доставки на спеціальному візку двох компонент ГУС до палаючого обладнання та безпосереднього подавання їх на палаючі елементи.

Гіпотезою дослідження є адекватність результатів імітаційного моделювання гасіння деталей та вузлів, що розташовані під вагоном метро з даними пожежогасіння фрагменту підлоги вагону, який за своїм пожежним навантаження співпадає з модельним вогнищем 1А.

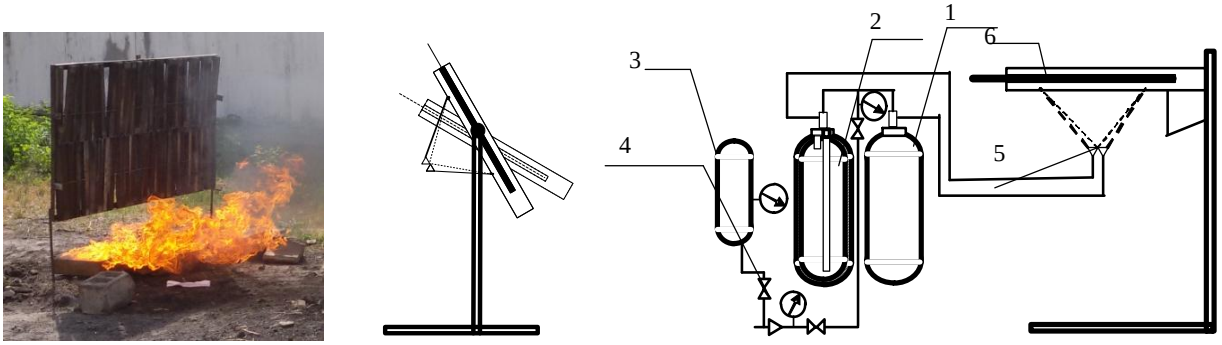
Дослідження проведено за методикою імітаційного моделювання загорянь модельних зразків елементів підвагонного обладнання вагону метро на спеціально зробленому стенді, який дозволяє змінювати положення модельного вогнища, фрагменту підлоги вагону, відносно кута подачі на пожежу вогнегасних речовин .

Для обробки даних використовувались статистичні методи регресійного аналізу. Для реалізації практичних експериментів імітаційного моделювання загорянь та розвитку пожеж під вагоном метро було виготовлено фрагмент підлоги вагону, який за своїм пожежним навантаження співпадає з модельним вогнищем 1А (рис. 1).

Рис. 1. Імітація підлоги вагону, яка за своїм пожежним навантаження близька до модельного вогнища 1А

Подача компонент ГУС на модельні вогнища здійснюється мобільною установкою пожежогасіння, яка може долати різноманітні перепони на шляху свого руху [14]. Щоб максимально наблизити умови експерименту до реального гасіння підвагонного простору, було зроблено спеціальний стенд (рис. 2), що дозволяв змі-

нювати положення модельного вогнища в просторі, до положення умовної стеліпідлоги. Завдяки спеціальному стенду подача ВГР (вода, порошок ПСБ – 3 та ГУС) здійснювалася на розташоване під змінним кутом α (рис. 2 б) модельне вогнище, аж до подачі знизу вверх на горизонтально розташовану поверхню (рис. 2 в).



а) **б)** **в)**

Рис. 2. Схема стендової установки для оцінки ефективності гасіння модельних вогнищ: а – вогнище розташовано вертикально; б – вогнище розташовано під кутом 30° та 60°; в – вогнище розташовано горизонтально під кутом 90°; 1 – ємність з водним розчином гелеутворювача; 2 – ємність з водним розчином каталізатора гелеутворення; 3 – компресор; 4 – вентиль; 5 – розпилювач; 6 – модельне вогнище

Процедура розпалювання модельного вогнища мала наступну послідовність. На підставці розміщувалось модельне вогнище, під яке вводився піддон, у якому поверх шару води наливалось 1 л бензину (рис. 2 а), 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 вогнегасних речовин. Ефективність гасіння характеризував проміжок часу від початку подавання розчину до припинення горіння. Результат вважався позитивним, якщо гасіння тривало до 70 с та протягом 600 с після закінчення гасіння, після чого не спостерігалася поява полум’я (рис. 3). Іншим, не менш важливим критерієм ефективності гасіння, була маса вогнегасної речовини, що пішла на гасіння, яка визначалася шляхом зважування установки до початку гасіння та після нього.

Рис. 3 Адгезія шару гелю на поверхні модельного вогнища з деревини

З результатів імітаційного моделювання зрозуміло, що адгезія шарів гелю активно перешкоджає зайвим витратам на гасіння вогнегасної речовини ГУС, на відміну від

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, Ю. І. Гапоненко та ін.

інших ВГР (стікання води, чи осипання порошку). Також адгезія гелю до поверхні є стійкою до інтенсивних повітряних потоків метрополітену, перешкоджаючи знесенню часток вогнегасного порошку повітряними потоками. Таким чином, витрата ГУС в рази менша по відношенню до інших вогнегасних речовин, що можуть використовуватись при гасінні підвагоного простору на станціях метрополітену.

5. Розробка проекту засобу подачі ГУС у підвагонний простір метрополітену

Враховуючи те, що основна частина матеріалів й обладнання вагонів сприяє швидкому розповсюдженню полум'я та поширенню витоку токсичних газів, які створюють при пожежі небезпеку отруєння людей продуктами горіння. Дійсно, це обумовлює істотні труднощі щодо проведення робіт пожежним-рятувальниуам.

Відомо, що пожежна небезпека пов'язана з обов'язковою наявністю трьох компонент протікання процесу горіння, а саме: горючої речовини, джерела запалення та кисню. Найбільш характерним для метрополітену є джерела запалення електричного походження так, як весь метрополітен пронизаний електричними комунікаціями з напругою струму від 12 В до 10 кВ. Також характерним є використання горючих матеріалів на рухомому складі, в службових приміщеннях та наявність кисню у повітрі, яке примусово подається в споруди метрополітену. При цьому, якщо враховувати, що кисень разом з повітрям рухається вздовж тунелів, станцій і вагонів, то з точки зору пожежної небезпеки, практично усе обладнання вагонів метро слід розглядати як специфічне пожежне навантаження, до якого не завжди має́ться доступ.

Зокрема, простір під вагоном є дуже вразливим місцем для виникнення безконтрольних загорянь та їх поширення. Так як швидкість притоку повітря з киснем тут відносно висока і тут зосереджені найімовірніші джерела запалювання (короткі замикання, технологічне перегрівання при гальмуваннях та ін.).

Доставку ГУС у підвагонний простір пропонується здійснювати за допомогою спеціального візка (рис. 4).

Такий візок містить розміщені на рамі вузької колії два балона з компонентами ГУС, що прикріплені до рами хомутами з замками, і має дві колісні пари, які разом з рамою створюють рухомий візок. Перша і друга колісні пари, спеціального візка, приєднані тросом до барабанної лебідки з відповідним приводом, діючим за принципом «тягни-штовхай». Сам візок встановлено на вузькій колії в середині основної колії руху вагонів метрополітену. Кожен балон заповнено під тиском одною компонентою ГУС та приєднано через запірний пристрій до спеціальної насадки, яка розпорошує компонент ГУС на палаючі елементи підвагонного обладнання. Протягування лебідкою візка повз всієї площі пожежі здійснюється стільки разів, скільки знадобиться до припинення горіння під вагоном.

Знаючи про недоліки застосування води й вогнегасного порошку при гасанні під вагоном та враховуючи необхідність здійснювати подачу ВГР знизу на похилі поверхні у підвагонному просторі, досліджувалась ефективність гасіння загорянь, коли ВГР подавалася під різними кутами на осередки пожеж. Для підвищення ефективності гасіння використовували ГУС, які в різних умовах мають досить міцну адгезію до поверхонь пожежогасіння, тим самим зменшуючи (відносно води та вогнегасного порошку) витрати ВГР.

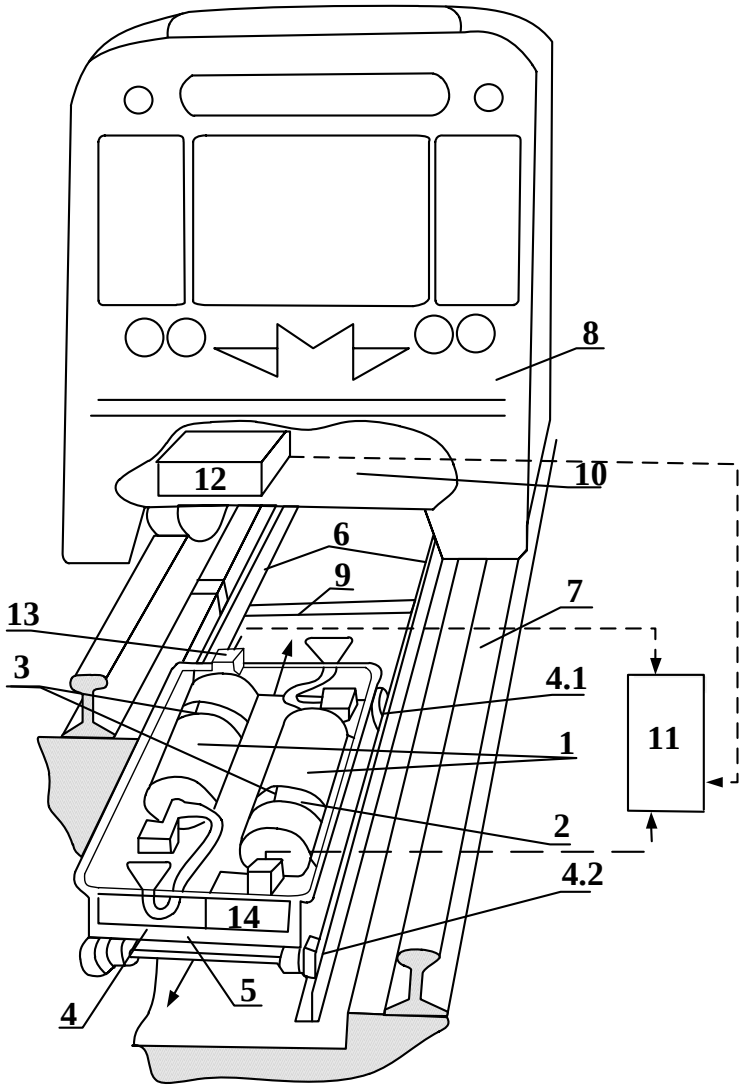


Рис. 4. Устрій підвагонного гасіння: 1 – балони з компонентами ГУС; 2 – хомути кріплення; 3 – замки кріплення; 4 – візок; 4.1, 4.2 – перша і друга колісні пари; 5 – зчіпка; 6 – вузькоколійна дорога; 7 – основна колія; 8 – вагон метрополітену; 9 – шпала; 10 – тягова лебідка з тросом «тягни-штовхай»; 11 – система управління рухом візка; 12 – система управління рухом вагону; 13 – датчик температур; 14 – тахометр

Для більш точного визначення переваг ГУС до найбільш поширених вогнегасних речовин, які використовуються при гасінні осередків пожеж під вагоном метро, нами були проведені наближені до реальності порівняльні експерименти з визначенням ефективності гасіння модельних вогнищ.

6. Експериментальні дослідження гасіння пожеж у підвагонному просторі вагонів метро

Для статистичного підтвердження щодо визнання найкращого способу гасіння пожеж будь-яких елементів підвагонного обладнання, на створеній стендовій установці було проведено порівняльні експерименти у загальному обсязі n=180 за усередненням по 20-ти випробувань для кожного з 3-х типів ВГР (ГУС, вода, вогнегасний порошок), з визначенням середніх значень часу t та витрати ВГР на гасіння пожежі при трьох заданих кутах нахилу їх подавання α^o на модельну пожежу (табл. 1).

Вирішуючи завдання пошуку залежностей середнього часу t гасіння від кута відносного нахилу устрою подачі ВГР застосуємо відомий метод статистичного

 © К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, Ю. І. Гапоненко та ін.

аналізу – регресійний аналіз, який приблизно апроксимує залежності, що досліджуються. Результати представлено у вигляді графічної інтерпретації (рис. 5–7).

Синій колір. (рис. 5–7) – це реалізація найпростішої лінійної регресії, аналітичний вигляд якої буде:

для розчину ГУС: t=40,30+0,05444α;

для води: t =86,80+0,2544 α;

для вогнегасного порошку: t=46,27+0,1422 α.

Табл. 1. Порівняльні дані для оцінки ефективності гасіння під різними кутами нахилу модельного вогнища за допомогою різних ВГР: ГУС, вода, вогнегасний порошок

№	Кут α^o нахилу модельного вогнища	ГУС		Вода		Вогнегасний порошок	
		Q, кг	t, с	Q, кг	t, с	Q, г	t, с
1.	30	3	40	8,8	94,4	4,4	48
2.	30	3,1	42	9	95	4,5	49
3.	30	3	38	8,7	93	4,3	47
4.	60	3,3	43	11,5	101	5,5	61
5.	60	3,2	44	11,3	100	5,4	59
6.	60	3,3	44	11,7	105	5,6	63
7.	90	3,5	45	12,8	107	6,5	55
8.	90	3,7	47	13	109	6,6	56
9.	90	3,6	46	13,1	110	6,7	58

Примітка: Q – витрати вогнегасної речовини; t– час гасіння модельного вогнища

Червоний колір. (рис. 5–7) – це наближення, де вихідні дані долучаються до статистичного багаточлена другого порядку.

для розчину ГУС маємо: $t= -0,0003571\ \alpha^2+0,09730\ \alpha +39,23$;

для гасіння водою залежність має вигляд: $t=-0,001786\ \alpha^2+0,4687\ \alpha +81,44$;

для вогнегасного порошку $t= -0,0075\ \alpha^2+1,042\ \alpha +23,77$.

Зелений колір. Регресії у вигляді поліному третього ступеню з побудовою їх графіків та реальних точок їх кривих:

для розчину ГУС, маємо: $t=0,00006162\ \alpha^3-0,01125\ \alpha^2+0,6846\ \alpha+29,78$;

для гасіння водою: $t=0,00001957\ \alpha^3-0,005245\ \alpha^2+0,6552\ \alpha+78,44$;

для вогнегасного порошку: $t=0,00001614\ \alpha^3-0,004647\ \alpha^2+0,8884\ \alpha+26,2$.

На рис. 5–7 відзначені середні значення часу t та показано, що найкраще за часом гасіння пожеж досягається розчином ГУС при куті гасіння $\alpha=30^o$.

Примітка: (рис. 5–7) – це інші регресії, але для тих самих даних α^o нахилу устрою подачі ВГР на гасіння ($\alpha=30^o$, $\alpha=60^o$ і $\alpha=90^o$).

Неважко помітити, що лише для полінома другого ступеня точки вихідних даних точно укладаються на криву полінома, оскільки в цьому випадку (3 точки) регресія перетворюється на поліноміальну апроксимацію.

7. Обговорення результатів дослідження гасіння підвагоного простору метро ГУС

З наведених даних експериментальних досліджень у табл. 1 видно, що мож-

ливості використання ГУС при гасінні підвагонного простору в рази перевершують за вогнегасною здатністю воду та дозволяють в 2,5 рази швидше погасити вогнище ніж вода. Також, й вогнегасний порошок має вогнегасну здатність нижчу ніж ГУС, оскільки його витрачається в 1,5 рази більше для гасіння модельного вогнища та час гасіння є більшим. Крім цього, вогнегасний порошок в тричі дорожчий, та вимагає заправки на спеціалізованих підприємствах на відміну від ГУС.

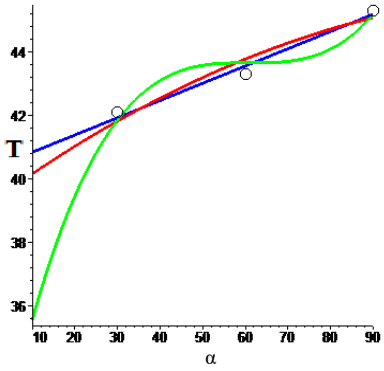


Рис. 5. Регресійна залежність кута нахилу від середнього часу t гасіння розчином ГУС

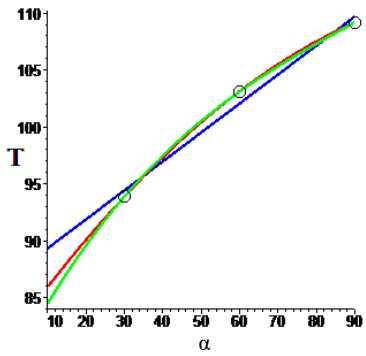


Рис. 6. Регресійна залежність кута нахилу від середнього часу t гасіння водою

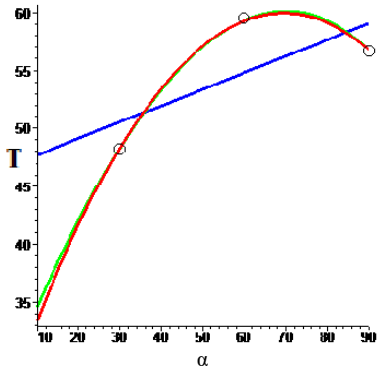


Рис. 7. Регресійна залежність кута нахилу від середнього часу t гасіння порошком

Отриманні результати меншої витрати ГУС у 2,5 рази в порівняні з гасінням водою та меншої на 50 % в порівняні з вогнегасним порошком пояснюються тим, що завдяки адгезій ГУС до поверхонь пожежогасіння, вдається запобігти нераціональним втратам ВГР від стікання, на відміну від води, а також здування інтенсивними повітряними потоками вогнегасного порошку. Отриманні результати регресійної залежності кута нахилу палаючої поверхні від середнього часу гасіння розчином ГУС (рис. 5) яскраво демонструють перевагу їх застосування при подачі вогнегасної речовини на палаючі поверхні з низу в гору, оскільки при використанні ГУС їх ефективність суттєво не змінюється при зміні кута нахилу поверхні. Такі результати пояснюються тим, що ГУС при потраплянні на палаючі поверхні миттєво самозакріплюється на них, тим самим призводячи до більш раціонального використання ВГР. Результати (рис. 6) показують суттєву залежність часу гасіння від кута нахилу палаючої поверхні, при використанні води в якості вогнегасної речовини. Так, при збільшенні кута нахилу до 90 °, час гасіння збільшується на понад 20 %. Такі результати пояснюються тим, що значна частина води поданої на модельне вогнище не приймає участь у процесі гасіння, оскільки стікає з вертикальних поверхонь не затримуючись на них. Також, особливо важливо підкреслити, що цей ефект збільшується при зміні кута нахилу палаючої поверхні.

Регресійна залежність кута нахилу від середнього часу гасіння порошком (рис. 7) також показує збільшення часу гасіння на понад 25 %. Такі результати можна пояснити тим, що при подачі вогнегасного порошку знизу в гору значна його кількість, через короткий проміжок часу, осідає та не має постійного впливу на об’єкт пожежогасіння.

Особливістю запропонованого методу гасіння пожежонебезпечного обладнання під вагонами метро є використання спеціального візка підвагонного гасіння. Спеціальний візок розташований всередині основної колії руху вагонів метрополітену в поглибленні лотка водозбірника. Рух візка забезпечується приєднаним

© К. М. Остапов, Ю. М. Сенчихін, В. Г. Аветісян, Ю. І. Гапоненко та ін.

до нього тросом тягової лебідки, що діє за принципом «тягни-штовхай». Система управління рухом візка автономна і забезпечена датчиком температур і датчиком-тахометром, за допомогою яких можливо контролювати режим руху візка, залежно від факту наближення візка до осередку пожежі у підвагонному просторі. Режим відкривання запірних пристроїв подачі ВГР може здійснюється дистанційно радіо сигналами. Особливістю отриманих результатів можливого використання спеціального візка підвагонного гасіння в порівнянні з використанням існуючих, зараз, на станціях та у вагонах метрополітену засобів пожежогасіння є зменшення ймовірності отримання травм пожежними та працівниками станції при гасінні пожеж у важкодоступних місцях під вагонами метро, за рахунок дистанційного керування спеціальним візком.

Щодо обмежень, притаманних дослідженням в цьому напрямку слід сказати, що для підтвердження гіпотези, покладеної в основу нашого проекту, необхідно виготовлення дослідного зразку спеціального візка для підвагонного гасіння пожеж на станціях метро. Потім, як завжди зі створенням нової техніки, провести додаткові дослідження з визначенням недоліків проекту та їх усуненням. Недоліком даного дослідження можна відзначити використання, в якості модельного вогнища, лише однієї з можливих горючих речовин у підвагонному просторі, елемента дерев'яної підлоги. В перспективі планується дослідити ефективність гасіння ГУС елементів обладнання під вагоном метро з інших розповсюджених матеріалів, наприклад, таких як гума та полівінілхлорид.

Розвиток даного дослідження полягає в наступному: досвід вирішення проблеми підвагонного гасіння пожеж може бути розповсюджено на увесь рейковий транспорт пасажирського й промислового призначення. Під час практичного впровадження спеціального візка підвагонного гасіння ГУС можуть виникнути труднощі з надійністю елементів його конструкції. Дійсно, під час дослідних випробувань з гасіння підвагонного простору, деякі елементи конструкції візка, при тривалому впливу високих температур, можуть деформуватися. Але ці питання не складно вирішити шляхом застосування сучасних вогнетривких матеріалів.

8. Висновки

1. Розроблено проект технічного засобу щодо подачі у важкодоступні місця під вагонами метро нової, більш ефективної для гасіння підвагонного простору вогнегасної речовини. Сформульовано проблему підвищення технологічних і технічних спроможностей пожежогасіння у підвагонному просторі електропотягів на станціях метрополітену. Для удосконалення гасіння підвагонного простору запропоновано використовувати нові, більш ефективні, за рахунок адгезії до палаючих поверхонь, гелеутворюючі склади. З метою забезпечення подачі вогнегасних речовин у важкодоступні місця під вагонами метрополітену запропоновано використовувати спеціальний візок, що рухається всередині основної колії метрополітену в поглибленні лотка водозбірника. Встановлено, що завдяки синтезу адгезійних властивостей гелеутворюючих складів та спеціального візка оперативної доставки їх складових до палаючих елементів підвагонного обладнання вагонів метрополітену отримано позитивні результати підвищення ефективності протипожежного захисту від пожеж у підвагонному просторі вагонів на станціях метрополітену.

2. Проведено експериментальні дослідження щодо гасінні пожеж у підвагонному просторі вагонів метро різними вогнегасними речовинами та визначено

вплив зміні кута нахилу об'єкта пожежогасіння на ефективність гасіння різними вогнегасними речовинами. Підтверджено, що основною перевагою гелю є адгезія до поверхонь з різним нахилом, що має місце у підвагонному просторі. Визначено, що за рахунок адгезії гелю до поверхні горючої речовини, вдається зменшити втрати вогнегасної речовини в 3 рази у порівняні з водою та 1,5 рази в порівняні з вогнегасним порошком. Визначено, що при зміні кута нахилу об'єкта пожежогасіння, ефективність гасіння ГУС, в результаті стійкої адгезій гелю до поверхні, є незміною. Однак при гасіння водою або вогнегасним порошком зі збільшенням кута нахилу поверхні α до 90^{o} ефективність їх пожежогасіння зменшується на 48 % та 53 % (відповідно).

Література

1. Long Z., Zhong M., Chen J., Cheng H. 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

2. Wang K., Cai W., Zhang Y., Hao H., Wang Z. 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

3. 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

4. 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. 2018. P. 31–36. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/7121

5. 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

6. 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

7. 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

8. 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

9. Limao Z., Xianguo W., Menjie L., Wenli L., Baabak A. 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

10. Du D., Pan X., Hua M. Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. Procedia Engineering. 2018. P. 142–148. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.126

11. Ostapov K., Senchykhyn Y., Syrovoi V., Avetisian V. 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

12. Chernukha A., Teslenko A., Kovalov P., Bezuglov O. Mathematical modeling of fire-proof efficiency of coatings based on silicate composition. Materials science forum. 2019. Vol. 1006. P. 70–75. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1006.70

13. 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

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

K. Ostapov[1], *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
Y. Senchykhyn[1], *PhD, Professor, Professor of the Department*
V. Avetisian[1], *PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
Y. Haponenko[1], *Lecturer o fthe Department*
I. Kirichenko[2], *DSc., Professor, Professor of the Department*
[1]National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
[2]Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF EXTINGUISHING FIRES IN THE UNDERCARRIAGE OF THE SUBWAY WITH GEL-FORMING COMPOUNDS

The effectiveness of extinguishing fires in the undercarriage space of cars at subway stations has been increased due to the use of a special trolley for supplying gel-forming compounds to hard-to-reach places under subway cars. In order to ensure the delivery of the gelling system to hard-to-reach places under the subway cars, it is proposed to use a special cart that moves inside the main track of the subway in the deepened tray of the water collector, thanks to a cable winch on the «pull-push» principle with an autonomous electric reversing drive. To confirm the effectiveness of extinguishing, on a special stand that allowed changing the position of the model hearth in space, to the position of the conventional ceiling-floor, comparative experiments were conducted for three types of the most common fire extinguishing agents, with the determination of the average values of the time and consumption of fire extinguishing agents for fire extinguishing, with at different angles of inclination of their submission. It is recognized that the use of gel-forming compounds when extinguishing equipment elements in the undercarriage space helps to reduce extinguishing costs and allows to extinguish the fire under the car 2,5 times faster. It was established that the change in the angle of inclination of the burning surface significantly affects the effectiveness of extinguishing with water and fire-extinguishing powder. The obtained data confirm the expediency of creating special carts for undercarriage extinguishing using fire-extinguishing gelling compounds. The obtained results are useful and important, as they confirm the increase in the effectiveness of extinguishing the weighted space with gel-forming compositions, reflect a reduction in times of time and consumption of fire extinguishing agent when using gel-forming compositions. The use of a special weighted extinguishing cart with gel-forming compositions allows automated remote extinguishing in hard-to-reach places of the weighted space, which significantly increases the safety of rescuers when extinguishing such fires.

Keywords: flammable substance, gel-forming composition, subway car, undercarriage extinguishing trolley

References

1. 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

2. 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

3. 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

4. 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

5. 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

6. 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

7. 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

8. 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

9. Limao, Z., Xianguo, W., Menjie, L., Wenli, L., Baabak, A. (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

10. Du, D., Pan, X., Hua, M. (2018). Experimental study on fire extinguishing properties of compound superfine powder. Procedia engineering, 142–148. doi: 10.1016/j.proeng.2017.12.126

11. Ostapov, K., Senchykhyn, Y., Syrovoi, V., Avetisian, V. (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

12. Chernukha, A., Teslenko, A., Kovalov, P., Bezuglov, O. (2019). 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

13. 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.

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

Надійшла до редколегії: 18.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

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)*
Н. В. Мінська, *д.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0001-8438-0618)*
А. Я. Шаршанов, *д.т.н., доцент. ст. викл. каф. (ORCID 0000-0002-9115-3453)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ГАСІННЯ МОДЕЛЬНОГО ВОГНИЩА ПОЖЕЖІ КЛАСУ «В» СИПКИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Експериментально визначено витрати компонентів вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів на гасіння модельного вогнища пожежі класу «В» середніх розмірів. За результатами попередніх досліджень з гасіння модельного вогнища пожежі класу «В» малих розмірів в якості компонентів такої системи обрано гранульоване піноскло з розміром гранул 10–15 мм, спучений перліт з розміром гранул 1,2±0,2 мм або вермикуліт з розміром пластинок 1×2 мм і розпилена вода. Піноскло в такій системі забезпечує їх плавучість та охолодження поверхневого шару рідини, що горить. Дрібний порошок спученого перліту забезпечує підвищення ізолюючих властивостей вогнегасної системи. Вода, що подається на верхній шар сипких матеріалів, крім підвищення ізолюючих і охолоджуючих властивостей системи, забезпечує довготривалу відсутність повторного займання. Для підвищення економічних параметрів вогнегасної системи проведено оптимізацію її складу за параметром ефект – вартість. Встановлено, що найменші економічні витрати на гасіння бензину забезпечує послідовне подавання трьох компонентів: подрібненого піноскла, дисперсного спученого перліту та розпиленої води з такими питомими поверхневими витратами – 6,7 кг/м^2, 1,6 кг/м^2 і 2,0 кг/м^2 відповідно. Для оптимізованого складу було проведено дослідження з гасіння стандартного модельного вогнища пожежі класу «2В», результати яких близькі до результатів отриманих на модельних вогнищах малих та середніх розмірів. Показано, що запропонована вогнегасна система на основі легких сипких матеріалів має переваги за економічними та екологічними параметрами по зрівнянню з існуючими та раніш запропонованими засобами гасіння легкозаймистих рідин. Запропоновано засоби подавання легких сипких матеріалів. Відмічені напрямки робіт з впровадження вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів в практику пожежогасіння.

Ключові слова: легкозаймисті рідини, вогнегасні властивості, спучений перліт, подрібнене піноскло, оптимізація складу

1. Вступ

Пожежі за участю горючих та легкозаймистих рідин відносять до класу «В». Кількість таких пожеж та економічні збитки від них за останні роки залишаються на високому рівні [1–3]. Найбільш складними для гасіння пожеж класу «В» є пожежі в резервуарах великої місткості з легкозаймистими рідинами (ЛЗР). До останніх часів основними засобами гасіння таких пожеж були різні види вогнегасних пін [4–6]. Але всі види вогнегасних пін мають недоліки. В першу чергу з недоліків пін можна відміти їх низьку стійкість. Вони поступово руйнуються на поверхнях рідин. Руйнування пін суттєво прискорюється від дії теплового випромінювання полум'я рідини, що горить. До загального недоліку вогнегасних пін можна віднести неможливість їх використання для гасіння одночасно неполярних і полярних рідин. Такі види рідин потребують для свого гасіння використання різних типів піноутворювачів. Крім того, піноутворювачі містять у своєму складі поверхнево активні речовини, більшість з яких є екологічно небезпечними речовинами [7–8].

У зв'язку із зазначеним, підвищення ефективності гасіння пожеж класу «В» з використанням нових підходів та засобів є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Запропоновано багато різних методів збільшення вогнегасної ефективності існуючих засобів пожежогасіння пожеж класу «В». Помітний ефект дають методи в яких реалізується механізм зриву полум'я [9]. Але цей підхід практично неможливо використати в разі реальної пожежі великих розмірів. Крім того, зрив полум'я не ліквідує можливість повторного займання [10]. Подальший розвиток набули методи інтенсифікації тепловідведення [11] і використання піротехнічних складів [12]. Недоліком методів інтенсифікації тепловідведення [13] і використання піротехнічних складів є неможливість забезпечити охолодження легкозаймистих речовин нижче температури займання горючої рідини. Також нові можливості дають методи гасіння горючих рідин за рахунок складів, що спучуються [14]. Але в зв'язку з високими температурами спучування існуючих засобів цей метод обмежується гасінням тільки рідин з температурами кипіння вище 200ºС [15].

В роботі [16] наведено результати досліджень ізолюючих властивостей пін швидкого твердіння. Такі піни мають набагато більшу стійкість на поверхні як неполярних так і полярних рідин по зрівнянню з існуючими повітряно-механічними і компресійним пінами. За ізолюючими властивостями вони також мають кращі показники по зрівнянню з традиційним пінами. Виходячи з аналізу властивостей пін швидкого твердіння в роботі [17] зроблено висновок про переваги таких пін як засобів гасіння горючих рідин по зрівнянню з традиційними пінами. Але частина недоліків пінних засобів пожежогасіння притаманна пінам швидкого твердіння. По-перше, такі піни мають у своєму складі екологічно небезпечні поверхнево-активні речовини. По-друге, технічні засоби одержання і подавання таких пін значно складніші ніж повітряно-механічних пін. Крім того, стійкість пін швидкого твердіння не перевищує декількох годин в умовах відсутності теплового впливу. В разі інтенсивного теплового впливу вони руйнуються протягом 10–20 хвилин.

Для подолання відмічених недоліків вогнегасних пін запропоновані вогнегасні засоби на основі легких сипких матеріалів і гелеутворюючих систем [18]. Такі вогнегасні системи складають собою двошарове покриття, яке формується на поверхні горючої рідини. Нижній шар забезпечує плавучість всієї системи, а верхній шар гелю надає системі високі ізолюючі властивості [19].

В якості легкого сипкого матеріалу нижнього шару обґрунтовано використання гранульованого або подрібненого піноскла (ППС). ППС має високу плавучість у всіх ГР. Воно є негорючим, термічно стійким матеріалом. В умовах реальної пожежі шар ППС загальною висотою 5–6 см може зберігатися на поверхні рідини, що горить, необмежений час. Також для нього характерні високі екологічні та економічні характеристики. Шар ППС має низькі ізолюючі характеристики, але виявляє суттєві охолоджуючі характеристики. Це дозволяє використовувати ППС для гасіння висококиплячих рідин без додаткового нанесення шару гелю. В разі гасіння ЛЗР вогнегасний шар ППС повинен в більшості випадків перевищувати 50 см.

Для зменшення вогнегасної висоти шару ППС потрібне додаткове нанесення на поверхню ППС шару гелю. Для повної ізоляції ЛЗР треба забезпечити утворення на його поверхні суцільного шару гелю. Це досягається в разі забезпечення поверхневої витрати гелю ~1 г/см^2. Але експерименти дозволили встановити, що гасіння бензину може відбутися в разі загальної товщі шару піноскла не менше 12 см і питомої поверхневої витрати гелю не менше 0,2 г/см^2. Після нанесення шару гелю на шар ППС висотою 12 см горіння ЛЗР відбувається з низькою інтен-

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

сивністю. Це приводе до відсутності інтенсивних теплових потоків, що в свою чергу забезпечує багатогодинну стійкість гелевого шару.

Гасіння рідин, за допомогою вогнегасних засобів на основі легких сипких матеріалів і гелеутворюючих систем, має переваги, по зрівнянню з використанням для гасіння повітряно-механічних пін і пін швидкого твердіння, як в економічному, так і екологічному плані [18]. Але такий спосіб гасіння має свої недоліки. Він потребує використання трьох окремих вогнегасних речовин: легкого сипкого матеріалу, розчинів гелеутворювача і каталізатора гелеутворення. Це, в свою чергу, вимагає використання трьох окремих засобів подавання, що ускладнює весь процес гасіння. Ще одним з недоліків є велика густина гелевого шару, що потребує для забезпечення плавучості всієї вогнегасної системи збільшення висоти шару ППС.

В цілому можна констатувати, що в разі гасіння висококиплячих рідин найбільш ефективним вогнегасним засобом є змочене ППС. У разі гасіння ЛЗР, ефективність систем на основі ППС, як у випадку нанесення додаткового шару гелю, так і без його нанесення, суттєво менша, по зрівнянню з гасінням висококиплячих рідин. Для підвищення ефективності гасіння ЛЗР в роботі [20] запропоновано замість гелю на поверхню ППС наносити шар сухого або змоченого легкого сипкого матеріалу з меншим розміром гранул. В такому випадку дисперсний сипкий матеріал заповнює порожнини між гранулами ППС, що приводе до підвищення ізолюючих властивостей всього шару сипких матеріалів [21].

В цих роботах було проведено експериментальне дослідження вогнегасних властивостей систем, де в якості сипких матеріалів було обрано ППС з розміром гранул 10–15 мм, спучений перліт з розміром гранул 1,2±0,2 мм і пластинчатий вермикуліт з розміром пластинок 1×2 мм. На поверхню шару сипких матеріалів подавалась розпилена вода. На основі таких досліджень було визначено вогнегасні характеристики запропонованого засобу з використанням лабораторного модельного вогнища пожежі малих розмірів. Площа поверхні рідини в ньому складала 100 см^2. Для наближення умов гасіння до реальних потрібне збільшення розміру модельного вогнища. Кількісні характеристики вогнегасних характеристик, що отримані на модельних вогнищах пожежі більшого розміру, будуть наближені до умов реальних пожеж.

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

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є експериментальне визначення вогнегасних характеристик систем, призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів з використанням модельних вогнищ пожежі класу «В» більших за розміром, ніж лабораторне вогнище, та вибір оптимального складу вогнегасного засобу.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Розробити методику визначення вогнегасних властивостей систем призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів, з використанням модельних вогнищ пожежі класу «В» більших за розміром ніж лабораторне вогнище.

2. Провести планування експерименту з визначення вогнегасних властивостей систем на основі легких сипких матеріалів.

3. Експериментально визначити вогнегасні властивості систем на основі легких сипких матеріалів.

4. Провести оптимізацію її складу за параметром ефект – вартість.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є процеси гасіння легкозаймистих рідин з використанням пористих сипких негорючих матеріалів. Предметом дослідження є розробка методики визначення вогнегасних характеристик систем призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів. Гіпотезою дослідження є відповідність чисельних значень питомих масових витрат компонентів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода, які отримані на модельних вогнищах пожежі малих розмірів на стандартному вогнищі пожежі «2В».

Методи дослідження:

- стандартні експериментальні методи визначення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння, які модифіковані з урахуванням особливостей систем на основі сипких матеріалів;
- для визначення кількості горючих і вогнегасних речовин використовувались вагові і об'ємні методи;
- при визначенні гранулометричного складу сипких матеріалів застосовано ситовий аналіз;
- для оптимізації в фінансових витрат використані елементи економічного аналізу.

Дослідження проведено на основі раніше отриманих результатів з гасіння лабораторного модельного вогнища малих розмірів. При плануванні та обробці результатів експерименту було враховано, що гасіння модельного вогнища пожежі можна за різних співвідношень висот шарів ППС і спученого перліту. Тобто ці параметри гасіння не є незалежними.

Визначення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння потребує фіксації умов гасіння. У випадку гасіння рідин використовують модельні вогнища пожежі класу «В». Суттєвий вплив на результати гасіння мають розміри модельного вогнища і матеріали, які використовуються для створення такого вогнища. В попередніх дослідженнях було використано лабораторне модельне вогнище пожежі малих розмірів. Воно представляло собою тонкостінну металеву ємність циліндричної форми з радіусом 5,6 см (S=100 см^2) і висотою борта 10,8 см. Лабораторні модельні вогнища використовують для з'ясування факторів, що впливають на гасіння пожежі та оцінки вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння. Такі вогнища пожежі потребують невеликих часових і матеріальних витрат на відповідні дослідження. Наприклад, в розглянутому вище лабораторному модельному вогнищі об'єм горючої рідини складає ~0,1 л.

Використання модельного вогнища, яке вміщує на порядок більший об'єм горючої рідини, дозволяє отримати наближені до реальних пожеж значення вогнегасних характеристик засобів пожежогасіння. В цій роботі таким модельним вогнищем було обрано металеву ємність циліндричної форми з товщиною стінок 1,5 мм діаметром 18 см (S=255 см^2) і висотою борта 14 см. Об'єм горючої рідини, який заливається в таку ємність складає 1 л. Таке модельне вогнище в цій роботі буде використано для визначення оптимального складу вогнегасної системи.

В якості матеріалу нижнього шару вогнегасної системи також було обрано [19] ППС з розміром гранул 1,0–1,5 см. В якості верхнього ізолюючого шару було

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

використано спучений перліт з гранулами сферичної форми діаметром 1–1,5 мм. Цей матеріал виявив найкращі вогнегасні властивості під час досліджень з гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі класу «В» малих розмірів. В роботах [19, 20] було встановлено, що суттєво підвищити вогнегасні характеристики двошарової вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів можна шляхом змочування верхнього шару водою, або розчинами солей інгібіторів. Розчини солей інгібіторів забезпечують трохи більші вогнегасні властивості по зрівнянню з водою. Але виходячи з економічних та екологічних міркувань в подальших дослідженнях буде використовуватися вода. В якості ЛЗР було обрано автомобільний бензин А-92 з температурою спалаху –32°С.

5. Визначення вогнегасних характеристик систем на основі легких сипких матеріалів

5.1. Розробка методики визначення вогнегасних властивостей

Методика визначення вогнегасних властивостей систем призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів розроблена шляхом модифікації відповідної методики для лабораторних модельних вогнищ пожежі класу «В» малих розмірів. Параметри дека представлені вище.

В деко заливалися 0,5 л води і 1 л бензину АІ-92. Після чого бензин підпалювався. Через 2 хв вільного горіння на його поверхню наносились обрані шари ППС і спученого перліту. В разі якщо інтенсивність горіння зменшувалась до 1 балу по шкалі запропонованій в роботі [22] на поверхню рідни подавалось 51 г розпиленої води. Така кількість води відповідає питомій поверхневій витраті води 2 кг/м^2.

У всіх випадках за такої процедури відбувалось загасання полум’я. Через 5 хвилин після загасання полум’я до поверхні шару сипких матеріалів підносився факел, що горить. Якщо не відбувалось повторне займання, вважалось, що гасіння відбулось. Якщо спостерігалось займання, дослід повторювали з більшою на 1 мм висотою шару спученого перліту.

5.2. Планування експерименту з визначення вогнегасних властивостей

Запропонована вогнегасна система на основі легких матеріалів складається з трьох компонентів: ППС, спученого перліту і води. Під час дослідів з використанням лабораторного модельного вогнища пожежі було встановлено, що мінімальна висота шару ППС, що знаходиться вище рівня рідини, повинна бути 2 см. В іншому випадку суттєва частина перліту просипляється крізь шар ППС. Крім того, питома поверхнева витрата розпиленої води не повинна бути більше 2 кг/м^2, тому що надлишкова вода стікає в шар горючої рідини.

В дослідах з використанням лабораторного модельного вогнища базовий шар ППС досягав дна ємності, що не дозволяло йому затоплюватися в рідині. В реальних умовах при горінні резервуарів з ЛЗР при нанесені верхніх шарів, шар ППС поступово занурювався в рідину. Методика розрахунку потрібної загальної висоти шару ППС наведено в роботі [22].

Для відповідних розрахунків потрібно знання насипної щільності сипких матеріалів і плавучості ППС. Середні значення насипної густини і плавучості ППС і спученого перліту представлені в табл.1.

Ці дані дозволили встановити, що в бензині 1 см шару ППС може утримати верхній шар ППС висотою 1,1 см. Або в розрахунку 1 м^2 такий шар ППС може

утримати масу іншого матеріалу верхнього шару масою 1,08 кг/м^2. З цього випливає, що для забезпечення плавучості 2 кг/м^2 води потрібен шар ППС товщиною 1,85 см. В попередніх дослідах з гасіння лабораторного модельного вогнища пожежі встановлено, що максимальна товщина шару перліту, яка потрібна для гасіння складає 1 см. Це відповідає масовій поверхневій витраті перліту 1,63 кг/м^2. З цього випливає, що для забезпечення плавучості шару перліту висотою 1 см потрібен шар ППС висотою 1,51 см. Крім того, верхній шар вогнегасної системи, що знаходиться вище рівня, повинен мати шар ППС висотою не менш 2 см.

Табл. 1. Характеристики ППС і спученого перліту: насипна щільність (ρ), плавучість (П), розмір гранул (*l*) ППС і частки сипучого матеріалу, що просипається крізь шар подрібненого піноскла (просип)

Характеристика	Матеріал	
	піноскло	перліт
ρ, кг/м^3	98	163
П	0,52	0,25
l, мм	10 – 15	1,2±0,2
просип(%)	0	≤5

Підбір оптимального складу вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів буде проводитися шляхом зміни співвідношення висот шарів перліту і ППС. Масова поверхнева витрата води на основі попередніх результатів на лабораторному модельному вогнищі пожежі обрана рівною 2 кг/м^2. Тобто в розрахунку на 1 м^2 площі поверхні бензину маса шару вогнегасної системи, що знаходиться вище рівня бензину (m↑) складе:

$$\begin{aligned} &m\uparrow = m\uparrow(\text{ППС}) \oplus m(\text{пер}) \oplus m(H_2O) = \\ &h\uparrow(\text{ППС})\cdot\rho(\text{ППС}) \oplus h(\text{пер})\cdot\rho(\text{пер}) \oplus m(H_2O) = \\ &h\uparrow(\text{ППС})\cdot 98 \oplus h(\text{пер})\cdot 163 \oplus 2{,}00\ , \end{aligned} \tag{1}$$

де m↑(ППС)– маса шару ППС верхнього шару, m(пер) – маса перліту, m(H_2O) – маса води, h↑(ППС)– висота шару ППС верхнього шару,h(пер) – висота шару перліту, ρ(ППС) – насипна щільність ППС, ρ(пер) – насипна щільність перліту. Висота шарів у цій формулі виражена в метрах.

З наведених даних можна визначити висоту нижнього шару ППС (h↓(ППС)), який забезпечує плавучість верхнього шару.

$$h\uparrow(\text{ППС}) = \frac{10^{-2}}{1{,}08}\cdot\left(h\uparrow(\text{ППС})\cdot 98 \oplus h(\text{пер})\cdot 163 + 2{,}00\right). \tag{2}$$

На основі знань висоти нижнього і верхнього шару ППС можна розрахувати його загальну висоту.

$$\begin{aligned} &h(\text{заг})(\text{ППС}) = h\uparrow(\text{ППС}) \oplus \frac{10^{-2}}{1{,}08}\cdot\left(h\uparrow(\text{ППС})\cdot 98 \oplus h(\text{пер}\cdot 163) \oplus 2{,}00\right) = \\ &h\uparrow(\text{ППС}) \oplus h\uparrow(\text{ППС})\cdot 0{,}917 \oplus h(\text{пер})\cdot 1{,}509 \oplus 0{,}0185 = \\ &1{,}917\cdot h\uparrow(\text{ППС}) \oplus 1{,}509\cdot h(\text{пер}) \oplus 0{,}0185(\text{м})\ . \end{aligned} \tag{3}$$

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

За співвідношенням (3) в подальшому експерименті будуть розраховуватися товщини шарів ППС і перліту. При цьому буде прийматися до уваги, що мінімальна товщина шару ППС, що знаходиться вище рівня бензину повинна бути не менше 2 см.

Досягнути гасіння модельного вогнища пожежі можна за різних співвідношень висот шарів ППС і спученого перліту. Це позначає, що ці параметри гасіння не є незалежними. Тому подальший експеримент буде проводиться наступним чином. Буде фіксуватися загальна висота шару ППС з урахуванням, що висота шару ППС, що знаходиться вище рівня бензину, повинна складати не менше 2 см, і на верхній шар бінарної вогнегасної системи буде подаватися розпилена вода з питомою поверхневою витратою 2 кг/м^2. Оціночні витрати перліту будуть обрані з результатів отриманих під час досліджень лабораторного модельного вогнища пожежі малого розміру. На основі чого за формулою (3) буде розрахована загальна висота шару ППС. Далі будуть поступово збільшуватися з інтервалом 1 см загальні висоти шарів ППС і визначатися вогнегасні товщини шарів перліту.

5.3. Експериментальне визначення вогнегасних властивостей систем на основі легких сипких матеріалів

Дослідження починались з найменшої загальної висоти шару ППС рівною 7 см, що відповідало шару ППС, який знаходиться вище рівня бензину на 2 см. Початкова висота шару перліту була обрана рівною 1 см. Після подавання 51 г розпиленої води горіння припинилось. При цьому через 5 хвилин повторне займання не відбулося. В разі зменшення висоти шару перліту до 0,8 см за тих самих умов відбувалось повторне займання.

В подальшому в кожному наступному досліді загальну висоту шару ППС збільшували на 1 см, а початкову висоту шару перліту обирали згідно з результатів дослідів на лабораторному модельному вогнищі пожежі. В разі негативного результату досліду в наступному досліді збільшували висоту шару перліту на 0,1 см. В разі позитивного результату в наступному досліді зменшували висоту шару перліту на 0,1 см. Висоти шарів перліту визначалися ваговим методом. В табл. 2 наведено відповідні результати для висот шарів сипких матеріалів і розраховані на їх основі питомі поверхневі витрати сипких матеріалів потрібні для гасіння обраного модельного вогнища пожежі. На рис.1 наведено етапи проведення експерименту з гасіння бензину запропонованої вогнегасної системою.

Табл. 2. Вогнегасні висоти шарів і масові питомі поверхневі витрати для ППС (h(заг)(ППС), m(ППС) і спученого перліту (h(ППС),m(пер)) при сумісному використанні разом розпиленою водою (m(H_2O)= 2,0) кг/м^2 та загальна вартість вогнегасних засобів, що при сумісному використанні забезпечують гасіння бензину

h(заг)(ППС), см	7	8	9	10	11	12
m(ППС), кг/м^2	6,7	7,8	8,8	9,8	10,8	11,8
h(ППС), см	1,0	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3
m(пер), кг/м^2	1,6	1,1	0,8	0,6	0,5	0,5
$C_{заг}$, гр/м^2	124,91	129,63	137,12	146,68	158,31	172,01

Рис. 1. Етапи гасіння модельного вогнища вогнегасною системою ППС+перліт+вода: а – вільне горіння бензину; б – горіння після засипки ППС; в – засипка перліту; г – горіння з шаром перліту; д – розпилювання води; е – дослід на повторне займання

В табл. 2 наведені вогнегасні висоти шарів сипких матеріалів і відповідні ним масові питомі поверхневі витрати.

5.4. Оптимізація складу вогнегасної системи за параметром ефект – вартість

Важливішою складовою під час вибору вогнегасного засобу є економічний фактор. Розглянемо одну із складових цього фактору – вартість вогнегасних речовин. Для розрахунків були обрані мінімальні оптові ціни відповідних матеріалів в Україні станом на січень 2023 року. Фінансові витрати на воду в зв'язку з невеликим внеском її в загальну вартість вогнегасних речовин не будемо враховувати.

Нижче наведена вартість з розрахунку на 1 кг матеріалу:

– Спучений перліт: $C_{пер}$=20,7 грн/кг;

– ППС (скляна пінокрихта, Шостка: $C_{ППС}$=13,7 грн/кг.

Фінансові витрати вогнегасного засобу в розрахунку на 1 м^2 поверхні гасіння, що забезпечує гасіння ($C_{заг}$), становить:

$$C_{заг} = C_{ППС} \cdot m(ППС) \oplus C_{пер} \cdot m(пер). \quad (4)$$

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

Отримана за формулою (4) (на основі даних табл. 2) загальна вартість вогнегасних засобів, що при сумісному використанні забезпечують гасіння бензину, занесена останнім рядком табл. 2.

На основі даних останнього рядка табл. 2, використовуючи відповідну процедуру (функцію regress) середовища математичних розрахунків Mathcad, були отримані регресійні залежності загальної вартості вогнегасних засобів ($C_{заг}$) у вигляді лінійної, квадратичної та кубічної функції від висоти шару ППС (h(ППС)). Для кожного варіанту регресійної функції була розрахована залишкова дисперсія.

Проведене з використанням критерію Фішера порівняння залишкових дисперсій показало, що при рівні значимості 1 % квадратичний варіант функції регресії (у порівнянні з лінійним) є значимим, в той час як кубічний (у порівнянні з квадратичним) – не значимим. Таким чином шукана регресійна залежність має вигляд:

$$C_{заг} = a_0 \oplus a_1 \cdot h(ППС) \oplus a_2 \cdot h^2(ППС), \qquad (5)$$

де a_0=150,755 грн/м^2, a_1=–11,393 грн/(м^2·см), a_2=1,098 грн/(м^2·см^2), при цьому загальна товщина шару піноскла (h(ППС)) задається в сантиметрах. У цьому наближенні середнє квадратичне відхилення регресійних значень вартості від дослідних становить Б=0,17 грн/м^2.

Графік залежності (5) а також вихідні дослідні точки табл. 2 представлені на рис. 2.

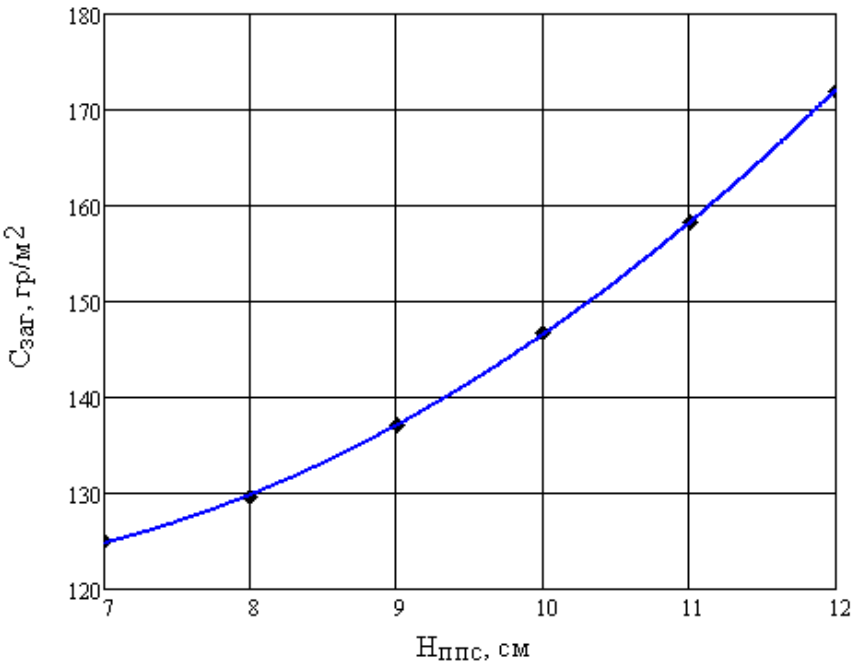


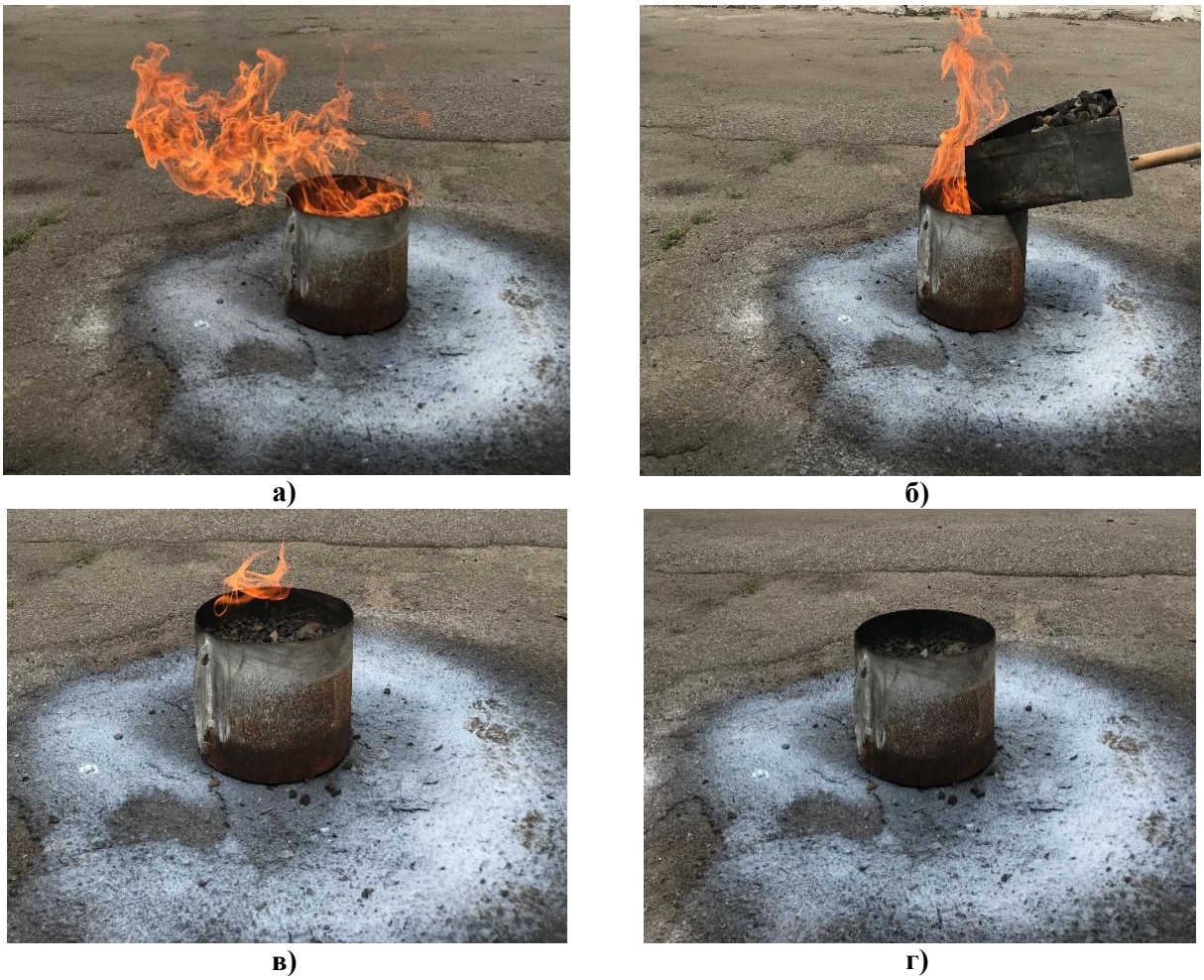
Рис. 2. Дослідні точки (◊) та регресійна залежність загальної вартості шарів вогнегасних матеріалів від товщини шару піноскла

Всі дані вказують на те, що найбільш економічний варіант гасіння реалізується при граничній (мінімальній) товщині шару піноскла $H_{ППС}$ = 7 см і висоті шару перліту 1 см. При цьому загальна вартість вогнегасних матеріалів приймає мінімальну величину min($C_{заг}$)≈125 гр/м^2. Нагадаємо, що зменшення min($C_{заг}$) внаслідок суттєвого

зменшення $H_{ППС}$ неможливе через зростання просипання перліту крізь шар піноскла із зменшенням h(ППС).

Для ще більш точного визначення параметрів вогнегасної системи на основі легких сипких матеріалів в роботі було використано стандартне модельне вогнище пожежі «2В» (виконання 2). Його параметри такі: товщина сталевих стінок 2 мм, діаметр дека – 28,8 см, вільна площа поверхні рідини – 650 $см^2$, горюча рідина – бензин (АІ-92) – 2 л, об'єм нижнього шару води – 4 л, висота вільного борту після заливання води і бензину – 11,6 см.

Питомі витрати компонентів вогнегасної системи були прийняті такими, які отримані для оптимального складу, отриманому з використанням модельного вогнища пожежі середнього розміру: $Ф_{ппс}$=6,7 кг/$м^2$, $Ф_{пер}$=1,6 кг/$м^2$, $Ф_{вода}$ =2 кг/$м^2$.Результати досліду показали, що за прийнятих витратах компонентів досягається гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «2В» (рис.3).



а) **б)** **в)** **г)**

Рис. 3. Етапи гасіння бензину в стандартному модельному вогнищі пожежі «2В»: а – вільне горіння бензину; б – засипання ППС; в – горіння після засипання перліту; г – припинення горіння після подачі води

Результати досліду показали, що за прийнятих витратах компонентів досягається гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «2В» (рис. 3).

6. Обговорення результатів експерименту з гасіння модельного вогнища пожежі

Візуальні спостереження ходу експерименту вказують на те, що в разі пнев-

матичної подачі спученого перліту на шар ППС більша його частина заповнює порожнини між гранулами у верхній частині шару ППС (рис. 1). Порівняння з подачею на таку поверхню компонентів гелеутворюючих систем вказує на перевагу спученого перліту як заповнювача порожнин між гранулами ППС. У разі формування гелю на поверхні верхнього шару ППС більша частина гелю формується на верхніх поверхнях гранул верхнього шару ППС. Лише невелика частка гелю утворюється на бічних поверхнях гранул і верхній поверхні гранул другого шару гранул ППС [18]. Це приводе до менших масових витрат спученого перліту по зрівнянню з використанням гелевих ізолюючих шарів.

Також аналіз отриманих результатів дозволяє констатувати, що змочування верхнього ізолюючого шару перліту водою призводить до підвищення ізолюючих, охолоджуючих, розбавляючих та вогнегасних властивостей перліту (h=1 см) (табл. 1) по зрівнянню з не змоченим перлітом (h=2 см) [19–20]. Це обумовлено тим, що вода заповнює порожнини між дрібними частинками спученого перліту, випарування її розбавляє пари горючої рідини та охолоджує верхній шар сипкого матеріалу. В цілому можна заключити, що механізм вогнегасної дії системи ППС+перліт+вода такий самий, як у системі ППС+гель, але перша система має перевагу в менших масових витратах вогнегасних речовин.

Результати експерименту підтвердили гіпотезу о підтвердженні чисельних значень питомих масових витрат компонентів вогнегасних систем піноскло + перліт і піноскло + перліт + вода, які отримані на модельних вогнищах пожежі малих розмірів та на стандартному вогнищі пожежі «2В». Це обумовлено однаковим механізмом гасіння бензину на модельних вогнищах пожежі різних розмірів та відсутності суттєвого вкладу впливу умов на границі стінки дека – шар вогнегасних матеріалів. Що в свою чергу пояснюється стійкістю шару вогнегасного засобу на основі легких сипких матеріалів при контакті з розігрітою стінкою дека. Треба відмітити , що в разі гасіння пінами, такі граничні умови помітно впливають на результати гасіння завдяки руйнуванню піни при контакті з розігрітою стінкою.

Розрахунок фінансових витрат на вогнегасні речовини вказує, що не зважаючи на те, що вартість подрібненого піноскла менша ($С_{ппс}$=13,7 грн/кг) ніж спученого перліту ($С_{пер}$=20,7 грн/кг) його використання в якості верхнього шару дає економічну перевагу (рис. 2). Також економічні розрахунки вказують на менші фінансові витрати на вогнегасні речовини для запропонованої системи (125 грн/м^2) по зрівнянню з пінними засобами пожежогасіння (~1000 грн/м^2) і системою ППС+гель (250 грн/м^2) [18]. Крім того, використання запропонованої системи має перевагу по зрівнянню з використанням гелів в простоті технічної реалізації подачі її компонентів. Для подачі компонентів гелеутворюючої системи потрібно застосування двох окремих технічних засобів для роздільно – одночасної подачі розчинів в розпиленому вигляді. У випадку запропонованої системи для роздільно – послідовної подачі двох сипких матеріалів (ППС і перліту) можна використати один і той засіб подачі. Подачу води можна здійснювати за допомогою існуючих засобів подавання рідин.

Ще однією перевагою запропонованої вогнегасною системи є її більша екологічна безпека. Обидва сипких матеріали, які використовуються в ній нетоксичні, інертні, нерозчинні у воді, термічно стійкі речовини. Після використання їх можна використовувати багаторазово після простих операцій сушіння і просіювання. Це виключає витрати на їх утилізацію.

Проведені експериментальні дослідження були проведені на модельних вог-

нищах пожежі класу «В» середніх розмірів. Однак умови горіння та пожежогасіння модельного вогнища істотно залежать від його розмірів. Тому, визначені експериментально, на модельних вогнищах середніх розмірів кількісні характеристики вогнегасної здатності вимагають уточнення на модельних вогнищах великих розмірів. Одночасно перехід на більш великі за розміром модельні вогнища потребує розробки інших засобів подавання вогнегасних речовин.

Одним зі шляхів розвитку вогнегасних засобів на основі легких сипких матеріалів є застосування нових видів легких сипких матеріалів, які будуть спеціально призначені для цілей пожежогасіння рідин. У запропонованій роботі сипкі матеріали були обрані з таких, що виробляються в промислових масштабах у нашій країні. Такі матеріали призначались для різноманітних цілей, вони повністю не враховували вимоги до ефективних засобів пожежогасіння. Одними з важливіших вимог до вогнегасного засобу на основі сипких матеріалів є висока плавучість матеріалу нижнього шару вогнегасної системи і низька щільність матеріалу верхнього шару. Для матеріалу верхнього шару також бажано забезпечити його підвищену вологоємність.

7. Висновки

1. Розроблено методику визначення вогнегасних властивостей систем призначених для гасіння легкозаймистих рідин на основі легких сипких матеріалів з використанням модельних вогнищ пожежі класу «В» більших за розміром ніж лабораторне вогнище.

2. З урахуванням того, що вогнегасні висоти шарів подрібненого піноскла і спученого перліту не є незалежними, проведено планування експерименту з визначення вогнегасних властивостей систем на основі легких сипких матеріалів. Експериментально визначені висоти шарів і масові поверхневі витрати подрібненого піноскла і спученого перліту, які забезпечують гасіння бензину в модельному вогнищі пожежі класу «В» за розміром більших ніж лабораторне модельне вогнище. Додаткове нанесення на верхній шар спученого перліту води дозволить зменшити його вогнегасну висоту шару з двох до 1 см.

3. На основі оптимізації складу вогнегасної системи за параметром ефект – вартість встановлено, що перевагу має система з наступними масовими поверхневими витратами: подрібненого піноскла – 6,7 кг/м^2, спученого перліту – 1,6 кг/м^2, води – 2,0 кг/м^2. Експериментально встановлено, що за оптимальних витратах компонентів досягається гасіння стандартного модельного вогнища пожежі «2В».

4. Економічні розрахунки вказують на перевагу запропонованої вогнегасної системи порівняно з системою піноскло + гель в 2 рази і піною у 8 разів.

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/osflammableorCombustibleLiquidtank 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 System to 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. Fire extinguishing media. Foam concentrates. Part 1: Specification for medium expansion foam concentrates for surface application towater-immiscible liquids.

5. EN 1568-2:2018. Fire extinguishing 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. Analytics of sur 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 blow-out. 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 fire-proof 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 thechemical 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. ExperimentalStudy 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. 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

18. Дадашов І. Ф., Кірєєв О. О., Трегубов Д. Г., Тарахно О. В. Гасіння горючих рідин твердими пористими матеріалами та гелеутворюючими системами. Харків, 2021. 240 с.

19. 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

20. 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

21. Dadashov I., Kireev A. Kirichenko I., Kovalev A., Sharshanov A. Simulation of the properties two-laermaterial. Functional Materials. 2018. Vol. 25. № 4. P. 774–779. doi: 10.15407/fm25.04.1

22. Бабашов І. Б., Дадашов І. Ф., Кірєєв О. О., Савченко О. В., Мусаєв М. Є. Результати визначення вогнегасних характеристик легких сипких матеріалів при гасінні етанолу. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2023. № 1(37). С. 250–263. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-18

V. Makarenko, *Adjunct*
A. Kireev, *DSc, Associate Professor, Professor of the Department References*
M. Chyrkina-Kharlamova, *PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department*
N. Minska, *DSc, Associate Professor, Associate Professor of the Department*
A. Sharshanov, *DSc, Associate Professor, Senior Lecturer of the Department*
National University of Civil Protection of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

STUDY OF EXTINGUISHING A MODEL FIRE OF CLASS «B» WITH BULK MATERIALS

The costs of components of the fire extinguishing system based on light loose materials for extinguishing a medium-sized class "B" model fire were experimentally determined. According to the results of preliminary studies on extinguishing a model fire of class "B" of small sizes, as components of such a system, granular foam glass with a granule size of 10–15 mm, expanded perlite with a granule size of 1,2±0,2 mm or vermiculite with a plate size of 1×2 mm and sprayed water. Styrofoam in such a system ensures its buoyancy and cooling of the surface layer of the burning liquid. The fine powder of expanded perlite improves the insulating properties of the fire extinguishing system. The water supplied to the upper layer of loose materials, in addition to increasing the insulating and cooling properties of the system, ensured the long-term absence of re-ignition. To increase the economic parameters of the fire extinguishing system, its composition was optimized according to the effect-cost parameter. It was established that the lowest economic costs for extinguishing gasoline are provided by the sequential supply of three components: crushed foam glass, dispersed expanded perlite and sprayed water with such specific surface costs – 6,7 kg/m^2, 1,6 kg/m^2 and 2,0 kg/m^2 in accordance. For the optimized composition, a study was carried out on extinguishing a standard model fire 2"B", the results of which are close to the results obtained on model fires of small and medium sizes. It is shown that the proposed fire extinguishing system based on light loose materials has advantages in terms of economic and environ-

mental parameters compared to existing and previously proposed means of extinguishing flammable liquids. Means of feeding light loose materials are proposed. The areas of work in the implementation of a fire extinguishing system based on light loose materials in the practice of fire extinguishing have been noted.

Keywords: flammable liquids, gasoline, fire-extinguishing properties, expanded perlite, crushed foam glass, composition optimization

References

1. Campbell, R. (2014). Fires at Outside Storage Tanks.National fire protection association. 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 Association. 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 ofLarge Scale Floating Roof Tanks. Procedia Engineering, 11, 189–195. 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 committee for standardization.

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 committee for standardization.

7. Olkowska, E., Polkowska, Z., Namieśnik, J. (2011). Analytics of sur 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. 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. 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. https://engineeringmechanics.az/uploads/2023/05/8-fhn-akademiya-musayev-meqale-03-11-2021.pdf

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

19. 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

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

21. Dadashov, I., Kireev, A., Kirichenko, I., Kovalev, A., Sharshanov, A. (2018). Simulation of the properties two-laermaterial. Functional Materials, (25, 4), 774–779. doi: 10.15407/fm25.04.1

22. Babashov, I. B., Dadashov, I. F., Kireev, O., Savchenko, A., Musayev, M. E. (2023). Rezul′taty vyznachennya vohnehasnykh kharakterystyk lehkykh sypkykh materialiv pry hasinni etanolu. Problems of Emergency Situations, (37), 250–263. doi: 10.52363/2524-0226-2023-37-18

Надійшла до редколегії: 18.09.2023
Прийнята до друку: 14.11.2023

УДК 351.861:504.064:614.8

О. А. Лєвтєров, *д.т.н., с.н.с., доц. каф. (ORCID 0000-0001-5926-7146)*
Є. С. Стативка, *ад'юнкт (ORCID 0000-0003-1536-2031)*
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗМІЩЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ АКУСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТУВАННЯ СПОРЯДЖЕННЯ РЯТУВАЛЬНИКА

Визначено оптимальне розміщення елементів акустичної системи орієнтування та спосіб ефективного екранування на спорядженні рятувальника для підвищення ефективності аварійно-рятувальних операцій в умовах обмеженої видимості та низької проникності світла. Проаналізовано вплив геометрії та конфігурації акустичних датчиків на їх взаємодію та визначення оптимальної мінімальної відстані між ними для поліпшення точності та ефективності системи орієнтування. Запропоновано їх ефективне екранування на шоломі рятувальника. Встановлено, що при достатньо малій відстані розміщення акустичних датчиків акустична якість та потужність акустичного сигналу зменшується, через явище інтерференції. Розроблено та реалізовано алгоритм компенсації взаємного впливу акустичних датчиків, розміщених в горизонтальній площині на захисному шоломі рятувальника. Розраховано та експериментально підтверджено мінімально допустиму відстань між акустичними датчиками, що дорівнює 0,04 м. Визначено оптимальний кутовий діапазон з використанням п'яти акустичних датчиків для точного просторового визначення перешкод у середовищі перед рятувальником на відстані до 2 метрів в умовах незадовільного візуального контролю. Розроблено алгоритм, що уникає взаємний вплив акустичного випромінювання акустичних датчиків один на одного, а також враховує відстань між датчиками згідно їх розташування на шоломі рятувальника. Створено алгоритм компенсації відстані між акустичними датчиками на шоломі рятувальника, враховуючи їх розташування в горизонтальній площині. Шляхом розрахунково-теоретичних досліджень розроблено підґрунтя для практичного створення акустичного приладу, з реалізованималгоритмом, що автоматично корегуєвеличину відстані, що виміряна датчиками попереду та датчиками позаду шолома рятувальника для одержання точних значень відстані до перешкодита забезпечити ефективну навігацію в умовах надзвичайних ситуацій.

Ключові слова: акустичний пристрій, сенсор, акустичний опір, конфігурація, візуальний контроль, інтерференція

1. Вступ

В критичних умовах надзвичайних ситуацій (НС) рятувальники повинні виявляти високу ефективність у проведенні аварійно-рятувальних робіт для забезпечення безпеки та порятунку громадян. Однією з ключових складностей проведення рятувальних операцій в умовах з незадовільним візуальним контролем (НВК) середовища, де обмежена видимість та низька проникність світла – є процес навігації та орієнтації. Зокрема, пожежі, руйнування будівельних конструкцій, техногенні катастрофи та інші НС можуть призвести до зростання густини задимлення, що ускладнює пошук та евакуацію постраждалих. За таких умов значно зростає роль застосування сучасних засобів та передових технологій для пошуку та надання допомоги постраждалим.

Згідно з даними [1] зростання кількості загиблих та постраждалих в НС у 2022 році пов'язано зі значною їх кількістю унаслідок НС воєнного характеру державного рівня у зв'язку з широкомасштабним вторгненням на територію України 24 лютого 2022 року збройних сил російської федерації. За оперативними даними внаслідок бойових дій зруйновано та пошкоджено близько 169 тис. об'єктів інфраструктури, зокрема: 6 тис. 400 об'єктів життєзабезпечення, понад

1 тис. об'єктів транспортної інфраструктури, більше як 3 тис. закладів освіти, майже 1 тис. 300 закладів охорони здоров'я, 150 тис. 300 житлових будинків, 670 адміністративних будівель, понад 4 тис. 500 тис. інших (не військових) об'єктів.

Акустичний метод орієнтування рятувальників та акустичний метод порятунку потерпілих є важливою складовою системи аварійно-рятувальних робіт в умовах НС. Методичними рекомендаціями передбачено використання акустичних пристроїв і сигналів для вирішення завдань навігації, локації та орієнтування в умовах з НВК середовища, а також виявлення місцезнаходження та пошуку шляху, доступу до потерпілих.

Акустична система орієнтування має стати невід'ємною частиною спорядження та оснащення рятувальників. Тому розвиток наукового підґрунтя впровадження акустичної системи орієнтування рятувальників в умовах незадовільного візуального контролю є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Методи орієнтування фахівців рятувальних служб у середовищі з НВК та виявлення потерпілих під завалами зруйнованих будівель відіграють критичну роль у проведенні рятувальних операцій в умовах НС.

Під час організації аварійно-рятувальних робіт з ліквідації наслідків НС пов'язаних з руйнуванням будівель, відповідно до [2] та методики [3], рятувальники використовують спеціальні прилади-геофони та метод прослуховування для пошуку потерпілих, що можуть перебувати під уламками будівлі. Проте не пояснюється, як точно акустична система визначає місцезнаходження потерпілих та яке її розширення зони покриття, необхідність визначення оптимального діапазону частот, кутового діапазону та рентабельної відстані для акустичної системи, щоб забезпечити ефективність в умовах НС з обмеженою видимістю та низькою проникністю світла.

У роботі [4] авторами для підвищення ефективності проведення аварійно-рятувальних робіт у середовищі з НВК пропонується використання акустичної системи (акустичних датчиків) розміщеної на спорядженні рятувальника. Проте, не наводиться коректне налаштування конфігурації даних пристроїв та не аргументується оптимальне розміщення на захисному одязі або спорядженні рятувальника, що може призвести до того, що сигнали цих пристроїв будуть взаємно перешкоджати один одному, викликаючи збої у роботі системи та надавати недостовірні дані. Також, слід зазначити, що в роботі акустичні датчики пропонується розміщувати в горизонтальній площині на шоломі рятувальника у формі дуги, що призведе до різниці показників відстані. Ця різниця в розташуванні акустичних датчиків створює ускладнення при точному визначенні місця знаходження. У підсумку це може спричинити неточні вимірювання та обробку даних, а також обмежити систему в здатності надавати точні та надійні інформаційні сигнали. Для подолання цього недоліку та забезпечення оптимального функціонування акустичних датчиків, доцільно розглядати використання захисних екранів або інших методів для мінімізації впливу перешкод на роботу системи.

У роботі [5] застосовується система орієнтування газодимозахисників у задимленому середовищі з використанням ультразвукових датчиків відстані, які розміщені на шоломі рятувальника з виведенням показників відстані на виносний

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

екран. Але в роботі експериментально не підтверджено та не досліджено те, що система акустичних датчиків може генерувати неточні дані через можливий взаємний вплив акустичних датчиків між собою. Також складові акустичної системи на шоломі рятувальника можуть перешкоджати правильному розгляду об'єктів через спеціальний візор або маску, на якому автори зосереджують увагу, що може впливати на ефективність проведення аварійно-рятувальних робіт. Їх сигнали будуть взаємно перешкоджати один одному. У представленій роботі використовується одночасний запуск всіх акустичних датчиків в системі, що може створити конфлікти та взаємні перешкоди в роботі цих датчиків. Недолік може призвести до паралельної передачі імпульсів, які, в свою чергу, можуть взаємодіяти та впливати один на одного, створюючи додатковий шум та нестабільність в роботі системи орієнтування. Також, автори обмежилися розміщенням лише одного акустичного датчика на шоломі рятувальника. Цей підхід викликає обґрунтовані обмеження в можливості розпізнавання характеру перешкоди та визначенні її місцезнаходження. Одиночний датчик не забезпечує необхідної точності та надійності даних для ефективного функціонування акустичної системи. Для поліпшення цього аспекту дослідження, доцільно розглянути можливість розміщення додаткових датчиків на інших частинах спорядження рятувальника або додаткових точках, що дозволить збільшити точність та надійність системи.

Таким чином, існує невизначеність у підході до розміщення акустичних датчиків, а також відсутність конкретних рекомендацій з оптимального розташування та налаштування акустичних датчиків при їх роботи в умовах надзвичайної ситуації внаслідок пожежі.

3. Мета і завдання дослідження

Мета дослідження полягає у визначенні оптимального розміщення елементів акустичної системи орієнтування на спорядженні рятувальника для підвищення ефективності аварійно-рятувальних операцій в умовах обмеженої видимості та низької проникності світла.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення наступні завдання:

– визначити оптимальне розміщення акустичних датчиків та спосіб їх ефективного екранування на шоломі рятувальника для уникнення взаємного впливу та забезпечення точних вимірювань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в умовах незадовільного візуального контролю;

– розробити та реалізувати алгоритм компенсації взаємного впливу акустичних датчиків, розміщених в горизонтальній площині на захисному шоломі рятувальника;

– визначити оптимальний кутовий діапазон з використанням п'яти акустичних датчиків для точного просторового визначення перешкод перед рятувальником на відстані до 2 метрів в умовах незадовільного візуального контролю.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – параметри акустичного пристрою в умовах надзвичайної ситуації. Предмет дослідження – процес розповсюдження акустичних хвиль в умовах НС. Гіпотеза дослідження – відмінності значень параметрів акустичного пристрою в умовах НС.

Методи дослідження – модельний експеримент, натурний експеримент, ста-

тистична обробка експериментальних даних. При виконанні роботи застосовувалися емпіричні, теоретичні, функціональні та системні методи дослідження.

Дослідження проводили методом натурного експерименту із використанням апаратних засобів (акустичних датчиків HC-SR04 та HC-SR05, процесору ATMEGA 2560, обладнання для монтажу акустичної системи на спорядженні рятувальника, захисний шолом рятувальника PAB Fire 05); програмних засобів.

5. Визначення оптимального розміщення акустичних датчиків на спорядженні рятувальника

Дослідження полягає в ретельному вивченні впливу геометрії та конфігурації акустичних датчиків на їх взаємодію, а також у визначенні оптимальної мінімальної відстані між датчиками. Це необхідно для досягнення точності виявлення перешкод та мінімізації кількості похибок в роботі системи.

Для визначення мінімальної допустимої відстані між акустичними датчиками на шоломі рятувальника необхідно звернути увагу на аналіз на аналіз ефекту екранування. Один із аспектів експерименту охоплює вимірювання при різних відстанях між датчиками, з урахуванням можливого взаємного впливу.

В цьому контексті датчики будуть розташовані на спеціальному макеті, що імітує голову рятувальника. На рис. 1 (вид згори) можна побачити графічне представлення розташування датчиків на шоломі.

Експериментальний підхід дозволяє систематично досліджувати взаємодію між акустичними датчиками при різних відстанях і враховувати можливий ефект екранування. Проведення вимірювань у середовищі з НВК дозволить знайти оптимальну мінімальну допустиму відстань між датчиками, яка забезпечить надійну та точну роботу системи орієнтування.

Рис. 1. Схема розміщення датчиків акустичної дії на захисному шоломі рятувальника PAB Fire 05 (– акустичний датчик, r – мінімально допустима відстань між датчиками)

Першим етапом є визначення початкових параметрів таких як розташування датчиків на захисному шоломі, згідно [6], рятувальника та орієнтування в просторі.

Переважна більшість сучасного спорядження, призначеного для захисту голови, розрахована на розмір від 55 см до 66 см в обхваті. При визначенні розташування датчиків на шоломі для рятувальників слід враховувати внутрішній діаметр шолома. Зазвичай цей параметр використовується для визначення розміру голови людини і, відповідно, розміру каски.

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

Формула для мінімальної відстані між датчиками, згідно [7], враховуючи їх кути розсіювання набуватиме вигляд: нехай D – діаметр голови (внутрішній діаметр шолома), N – кількість датчиків, A – кут розсіювання кожного датчика. Для того, щоб датчики перекривались мінімально, можна використовувати геометричну прогресію для визначення мінімальної відстані між центрами сусідніх датчиків.

Відстань між центрами датчиків можна визначити за допомогою наступної формули (1) для геометричної прогресії:

$$D_i = D \cdot \frac{1 - r^N}{1 - r}, \tag{1}$$

де D_i – відстань між центром поточного датчика і центром сусіднього, r – коефіцієнт прогресії. Визначити коефіцієнт прогресії можна за формулою (2):

$$r = \cos\left(\frac{A}{2}\right). \tag{2}$$

Тепер, знаючи відстань між центрами датчиків, можна визначити мінімальну відстань між ними за виразом (3):

$$D_{min} = D_i - D. \tag{3}$$

Ця формула враховує геометричний аспект розташування датчиків на шоломі.

Датчики розміщено на висоті 10–15 см від основи шолома. Кутовий діапазон [8] роботи сонарів HC-SR04 дорівнює 15 °, тоді згідно формули (3) мінімальна допустима відстань між акустичними датчиками дорівнює 0,04 м.

Для експериментального підтвердження виконаних розрахунків необхідно провести серію дослідів. Вимірюємо вплив розташування на точність визначення напрямку та відстані до перешкод.

Зміна відстані r між акустичними датчиками впливає на їх показання. Отримані дані заносимо до табл. 1.

Кут відхилення в дослідженні вказує на ступінь відхилення акустичних датчиків від їхнього основного напрямлення.

Табл. 1. Дані показань відстані акустичними датчиками на дистанції 2 м до перешкоди

Кут відхилення,°	Відстань між датчиками, м	Показання відстані акустичними датчиками				
		Датчик 1	Датчик 2	Датчик 3	Датчик 4	Датчик 5
0	0,04	1,85	1,92	1,78	1,8	1,95
15	0,08	20,0	1,88	1,65	1,75	1,92
30	0,12	2,33	1,67	1,52	18,1	2,05

Ці спостереження слід врахувати при подальших дослідженнях та розробці концепцій оптимального розміщення акустичних датчиків для підвищення надійності та точності системи орієнтування рятувальників.

Табл. 2. Середні значення показань акустичних датчиків на відстані 2 м

Кут відхилення (градуси)	Відстань між датчиками, м	Середнє показання, м
30	0,12	1,77
15	0,08	1,84
0	0,04	1,86

З табл. 2 випливає, що точність виміру відстані до перешкоди буде найвища тоді, коли відстань між датчиками наближається до значення 0,04 м. Так як середнє показання становить при цьому 1,86 м і наближається до сталої величини 2 м.

6. Розробка алгоритму компенсації взаємного впливу акустичних датчиків

Пропозиція для вирішення проблемного питання полягає у використанні послідовного вимикання акустичних датчиків з системи на короткий часовий інтервал. Це дозволить кожному датчику працювати і передавати інформацію без втручання з боку інших датчиків, що значно поліпшить стабільність та точність роботи системи в умовах надзвичайних ситуацій та забезпечить надійність отриманих даних.

З допомогою інтерпретованої об’єктно-орієнтованої мови програмування [9] створимо алгоритм послідовного вимикання датчиків для системи з п’ятьма датчиками. У цьому прикладі використовується цикл, щоб послідовно активувати кожен датчик на короткий часовий інтервал.

Програмний код алгоритму має вигляд:

```
{
defactivate_sensor(sensor_number):
print(f" {sensor_number}")
defdeactivate_sensor(sensor_number):
print(f" {sensor_number}")
Кількість датчиків
num_sensors = 5
Тривалість активації кожного датчика
activation_duration = 0.05 (50 мілісекунд)
forsensor_number inrange(1, num_sensors + 1):
activate_sensor(sensor_number)
deactivate_sensor(sensor_number).
}
```

Завдання полягатиме в усуненні відхилень у показаннях датчиків шляхом використання алгоритмів обчислення відстані та зведення п’яти значень до одного числового середнього для отримання найбільш точних результатів, встановлення оптимальних параметрів алгоритму компенсації та обчислення відстані для забезпечення точності та стабільності роботи системи в умовах НВК середовища.

При врахуванні різниці в показаннях датчиків необхідно використовувати алгоритм, що автоматично додає відстань, виміряну датчиками попереду, до

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

відстані, виміряної датчиками позаду шолома, щоб отримати більш точне показання відстані до перешкоди.

Для реалізації алгоритму компенсації [10] відстані між акустичними датчиками на шоломі рятувальника, враховуючи їх розташування в горизонтальній площині, використовуємо наступний підхід. Припустимо, що ми маємо п'ять акустичних датчиків, які розташовані в горизонтальній площині, і вони відділені один від одного на 4 см. Зазначимо відстань між першим і п'ятим датчиками як – D (відстань між ними, а також врахування діаметра голови рятувальника). За допомогою цієї величини D можна розрахувати компенсацію для показань датчиків. Нехай d_1 буде відстанню, виміряною першим датчиком, і d_5 – відстанню, виміряною п'ятим датчиком. Тоді компенсована відстань d_{comp} для першого датчика може бути розрахована з допомогою виразу (4):

$$d_{comp} = d_1 - \frac{4}{D} \times (d_5 - d_1). \quad (4)$$

Ця формула враховує відстань між датчиками і компенсує різницю у відстанях шляхом додавання частини відстані між п'ятим і першим датчиками до виміряної відстані першого датчика.

Аналогічно можна розглядати інші датчики, змінюючи індекси в формулі відповідно до їх порядкового номеру.

Важливо враховувати, що цей підхід передбачає лінійний характер зміни відстаней між датчиками. Якщо виникають складніші умови, може знадобитися використовувати більш складні моделі або методи компенсації.

Також розглянуто використання захисних екранів та перегородок [11] між датчиками для мінімізації взаємного впливу. В ході досліджень виявлено, що застосування захисних екранів дозволяє значно знизити взаємний вплив сигналів між окремими датчиками, що призводить до більш точних вимірювань. В середньому, використання захисних екранів покращувало точність вимірювань на 15–20 %.

Табл. 3. Кореговані значення показань акустичних датчиків на відстані 2 м після застосування алгоритму компенсації

Кут відхилення (градуси)	Кореговане показання
30	1,85
15	1,86
0	1,87

Після виконання дій запропонованих методів можна порівняти дані табл. 2 та табл. 3. Однак результати можуть залежати від конкретних умов експлуатації та характеристик самого захисного матеріалу.

7. Визначення оптимального кутового діапазону акустичної системи визначення відстані

Мета завдання полягатиме в покращенні ефективності системи орієнтування шляхом визначення оптимального кутового діапазону, який забезпечить визначення місцезнаходження перешкод та покращить загальну навігацію рятувальника в умовах обмеженої видимості та низької проникності світла.

Для вирішення завдання необхідний комплексний підхід, спрямований на

максимізацію точності та ефективності системи. Одними з важливих аспектів дослідження є ретельний аналіз різноманітних сценаріїв використання системи та моделювання діаграм направленості для визначення того, які кути охоплюються датчиками системи. Врахування потенційних перешкод, особливостей середовища та унікальних вимог користувачів дозволяє визначити оптимальні параметри кутового діапазону для максимально ефективного функціонування.

Відомо, що кут прийому одного датчика HC-SR04 складає 15 °. З урахуванням цього параметру, система, обладнана п’ятьма датчиками, охоплює простір приблизно в 75 °. Такий конфігураційний підхід дозволяє широко покривати область перед собою та ефективно реагувати на зміни у середовищі.

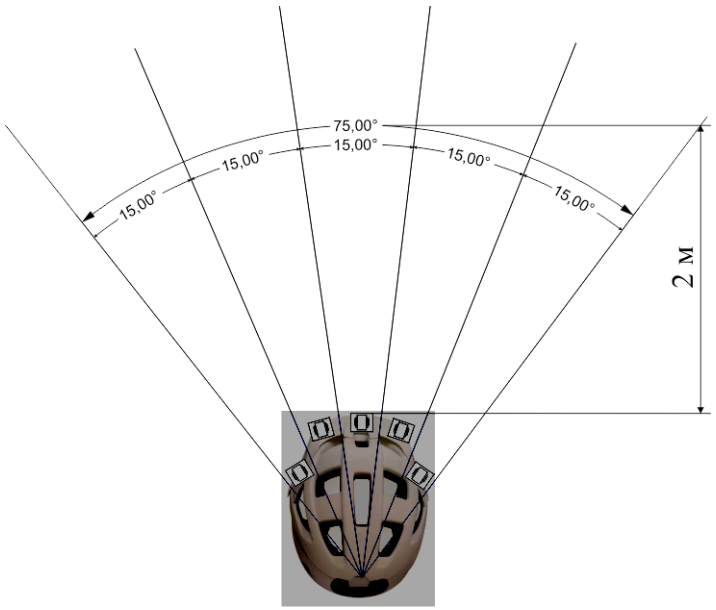


Рис. 2. Захисний шолом PAB Fire 05 та схема розташування з окремим поділом кутового діапазону середовища для окремого акустичного датчика (вид згори: (– акустичний датчик; ⟶ – напрям поширення акустичних хвиль)

Першим етапом є визначення початкових параметрів таких, як розташування датчиків на спорядженні рятувальника та їх орієнтування в просторі. Для аналізу візьмемо типову структуру європейського шолома рятувальника PAB Fire 05, який зображено на рис. 2 (вид згори) та схему розподілу кутового діапазону кожного окремого акустичного датчика.

Для розрахунку оптимального кутового діапазону використовується наступний алгоритм:

1) Визначення просторових обмежень, враховуючи конструкцію каски [12], обмеження її геометрії та області видимості.

2) Розташування датчиків в горизонтальній площині на шоломі на мінімально допустимій відстані із розділу 5 даного дослідження.

3) Визначення мінімально допустимої відстані між датчиками, при якій не виникає взаємної інтерференції.

4) Розрахунок кутового діапазону на основі результатів експериментів для забезпечення ефективності системи орієнтації.

5) Підтвердження отриманих результатів через серію тестових вимірювань.

Математичне підтвердження того використання датчиків з кутовим діапазо-

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

ном 15 ° і мінімальної відстані між ними 4 см для виключення утворення явища інтерференції має вигляд.

$$D_{min} > A_{(датчика)} \times tg(\frac{A_{(датчика)}}{2}), \quad (5)$$

$$D_{min} > 15° \times 0{,}133,$$

$$D_{min} > 2{,}0 см,$$

де $A_{датчика}$ – кутовий діапазон одного датчика (15 °), D_{min} – мінімальна відстань між датчиками (0,04 м).

Отже, з розрахунку випливає, що мінімальна відстань між обраними датчиками повинна становити більше ніж 2 см.

8. Обговорення результатів визначення параметрів акустичного приладу екіпірування рятувальників

Оптимальне розташування датчиків на шоломі рятувальника враховує геометричні аспекти та конфігурацію, забезпечуючи максимальне охоплення простору та мінімізацію взаємодії між ними. З отриманих результатів дослідження (табл. 1) випливає, що точність виміру відстані до перешкоди буде найвища тоді, коли відстань між датчиками наближається до значення 0,04 м. Так як середнє показання становить при цьому 1,86 м і наближається до сталої величини 2 м (табл. 2).

Використання захисних екранів або перегородок допомагає мінімізувати взаємний вплив датчиків, поліпшуючи точність та ефективність визначення відстані. Захисні екрани або перегородки можуть захищати датчики від непотрібних електромагнітних сигналів, які можуть виникати в рятувальному середовищі. Таким чином в окремих випадках, підвищуючи якість вимірювання дистанції на 15–20%. Захисні елементи служать бар'єром для механічних впливів, таких як удари чи тертя, що можуть впливати на точність роботи датчиків.

За допомогою алгоритму послідовного вимикання, реалізації програмного забезпечення досягається ефективне управління взаємодією з датчиками, а також зменшується ймовірність виникнення помилок через взаємний вплив. Використання одного датчика в певний момент часу дозволяє системі зосередитися на обробці сигналу з конкретного датчика, зменшуючи ймовірність конфліктів в системі.

В дослідженні запропоновано використання алгоритму, де кожен датчик має методи, що моделюють активацію та деактивацію датчика відповідно. Головна функція утворює п'ять датчиків, а потім послідовно активує та деактивує кожен датчик з інтервалом у 1 мкс.

Визначення оптимального кутового діапазону сприяє поліпшенню навігації рятувальника в умовах надзвичайних ситуацій, забезпечуючи точне визначення місцезнаходження перешкод. Система орієнтується на конкретні області навколишнього простору, спрощуючи процес збору інформації.

Розташовуючи датчики у формі круга чи іншої геометричної форми з відповідними кутами між ними так, щоб кожен з них охоплював свій унікальний сек-

тор простору, а кути прийому датчиків перекривалися дозволяє ефективно виявляти об'єкти або перешкоди в широкому кутовому діапазоні, що корисно для навігації та уникнення перешкод. При використанні 5-ти датчиків (рис.1), якщо кожен охоплює 15 ° кутового діапазону випромінювання і вони розташовані так, щоб їхні зони перекривались, то в сумі забезпечується охоплення простору приблизно в 75 ° (рис. 2).

Запропоновані пропозиції розміщення елементів акустичної системи враховують геометричні особливості шолома рятувальника, що дозволяє максимально ефективно використовувати простір перед рятувальником та мінімізувати взаємодію між датчиками.

Система ефективно працює в умовах обмеженої видимості та низької проникності світла, що є важливим фактором при ліквідації наслідків НС. Рішення можуть бути застосовані в сценаріях, при яких рятувальники опиняються в умовах з обмеженою видимістю та потребують точної навігації, в умовах підвищеної температури та високої концентрації зважених частинок.

Під час специфічних умов експерименту результати адаптуються лише під специфічні умови експерименту, не враховуючи різноманіття сценаріїв НС. Обмеження в точності, дальності вимірювань та інших характеристиках акустичних датчиків впливає на загальну ефективність системи. Необхідно вдосконалювати технічні характеристики датчиків, розроблювати нові технології акустичного виявлення.

Під час проведення досліджень проявляється недостатність вивчення реальних умов порятунку та взаємодії з іншими факторами, які виникають під час ліквідації наслідків НС. Необхідне включення до експериментів реальних умов, співпраця з рятувальниками та експертами для отримання додаткового контексту.

Система з визначеним оптимальним кутовим діапазоном в 75 ° може мати обмежений огляд порівняно з кутом обзору людських очей в 170 °. Це вказує на те, що система може фокусуватися на конкретних областях, тоді як людина може одночасно спостерігати за більш широким простором. Враховуючи це розходження, важливо оптимізувати роботу системи для конкретних завдань. Наприклад, якщо ліквідація наслідків НС передбачає обстеження широкого простору, систему може використовувати додаткові стратегії, такі як обертання або маневр, щоб охопити більшу територію.

Обмежений бюджет впливає на можливість використання новітніх технологій та обладнання. Можливе залучення фінансування та співпраця з індустрією для забезпечення доступності та використання передових технологій.

Розвиток даного дослідження може включати в себе кілька напрямків:

- покращення технічних характеристик акустичних датчиків;
- визначення впливу інших факторів НС;
- проведення таких досліджень може включати співпрацю з іншими вченими, інженерами та фахівцями рятувальних служб.

Під час проведення досліджень можливо зіткнутися з такими труднощами:

- при математичному моделюванні, електрична реалізація та розробки систем автономного забезпечення акустичної системи.
- створення алгоритмів обробки та аналізу даних;

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

• створення стандартів та протоколів безпеки для застосування системи в реальних умовах.

9. Висновки

1. Визначено оптимальне розміщення акустичних датчиків та їх ефективного екранування на шоломі рятувальника для уникнення взаємного впливу та забезпечення точних вимірювань під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій в умовах незадовільного візуального контролю. Встановлено, що при достатньо малій відстані між акустичними датчиками потужність акустичного сигналу зменшується через явище інтерференції. Розраховано та експериментально підтверджено мінімально допустиму відстань між акустичними датчиками, що дорівнює 0,04 м.

2. Розроблено та реалізовано алгоритм компенсації взаємного впливу акустичних датчиків, що враховує відстань між датчиками згідно їх розташування на шоломі рятувальника, а також уникає взаємний вплив акустичного випромінювання акустичних датчиків один на одного. Проаналізовано використання захисних екранів та перегородок між датчиками для мінімізації взаємного впливу.

3. Визначено оптимальний кутовий діапазон з використанням п’яти акустичних датчиків для точного просторового визначення перешкод перед рятувальником на відстані до 2 метрів в умовах незадовільного візуального. Розроблений сценарій направленості системи акустичних датчиків для визначення кутових діапазонів. Кут прийому одного датчика – 15 градусів, таким чином п’ять датчиків забезпечать охоплення простору приблизно в 75 градусів.

Література

1. Звіт про основні результати діяльності Державної служби України з надзвичайних ситуацій у 2022 році. URL: https://dsns.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0/publicni i- zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf

2. Наказ МВС від 26.04.2018 № 340 «Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text

3. Ратушний Р. Т., Лоїк В. Б., Синельніков О. Д., Ковальчук В. М. Навчальний посібник. Організація аварійно-рятувальних робіт. Видавництво ЛДУ БЖД. Львів, 2020. 394 с. URL: https://books.ldubgd.edu.ua/index.php/ed/catalog/download/90/56/260-2?inline=1

4. Лєвтєров О. А., Стативка Є. С. Визначення параметрів акустичного приладу екіпірування рятувальників. Problems of Emergency Situations. 2022. № 2. С. 280–295. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-21

5. Бас О. М., Лагно Д. В., Ножко І. О., Пелипенко М. Р. Використання ультразвуку для орієнтування у задимленому середовищі. Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація. 2021. №1. С. 15–26. doi: 10.31731/2524-2636.2021.5.1.-15-26

6. Каска пожежна. Технічні вимоги. Затверджено протоколом від 23.06.2023 № 12. URL: https://dsns.gov.ua/upload/1/8/2/3/0/8/1/kaska-pozezna-texnicni-vimogi-

zatverdzeno-protokolom-vid-23062023-12docx.pdf

7. Hiremath N., Kumar V., Motahari N., Shukla D. An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects. Metrology. 2021. P. 17–38. doi: 10.3390/metrology1010002

8. Kirtskhalia V. The dependence of the speed of sound in the Earth's atmosphere on its density and the correction of Mach's number. Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. P. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012037

9. Tei K., Shimizu R., Fukazawa Y., Honiden S. Model-Driven-Development-Based Stepwise Software Development Process for Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. Vol. 45. P. 675–687. doi: 10.1109/TSMC.2014.2360506

10. Teregulova E. A. Features of the Passage of Acoustic Waves at Right Angle through a System of Layers of Multifractional Gas Suspensions. Lobachevskii Journal of Mathematics. 2021. P. 2222–2225. doi: 10.1134/S1995080221090262

11. Choon M. P., Sang H. Lee. Propagation of acoustic waves in a metamaterial with a refractive index of near zero. Applied Physics Letters. 2013. P. 46–57. doi: 10.1063/1.4811742

12. Pozdieiev S., Nuianzin O., Sidnei S., Shchipets S. Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 116. № 02027. doi: 10.1051/matecconf/201711602027

13. Wilk-Jakubowski J. Analysis of Flame Suppression Capabilities Using Low-Frequency Acoustic Waves and Frequency Sweeping Techniques. Department of Information Systems. Kielce University of Technology. 2021. P. 5–8. doi: 10.3390/sym13071299

A. Levterov, *DSc, Senior Researcher, Associate Professor of the Department*
Y. Statyvka, *Adjunct*
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

OPTIMIZATION OF THE PARAMEERS OF THE PLACEMENT OF ELEMENTS OF THE ACOUSTIC SYSTEM FOR ORIENTATION OF RESCUER'S EQUIPMENT

The optimal placement of the elements of the acoustic orientation system and the method of effective shielding on the rescuer's equipment to improve the efficiency of rescue operations in conditions of limited visibility and low light transmission are determined. The influence of the geometry and configuration of acoustic sensors on their interaction and the determination of the optimal minimum distance between them to improve the accuracy and efficiency of the orientation system is analyzed. Their effective shielding on a rescuer's helmet is proposed. It is established that at a sufficiently small distance between the acoustic sensors, the acoustic quality and power of the acoustic signal decreases due to the phenomenon of interference. An algorithm for compensating for the mutual influence of acoustic sensors placed in a horizontal plane on a rescuer's protective helmet was developed and implemented. The minimum permissible distance between acoustic sensors equal to 0,04 m was calculated and experimentally confirmed. The optimal angular range using five acoustic sensors for accurate spatial detection of obstacles in the environment in front of a rescuer at a distance of up to 2 meters under conditions of unsatisfactory visual control is determined. An algorithm has been developed that avoids the mutual influence of acoustic radiation from acoustic sensors on each other and also takes into account the distance between the sensors according to their location on the rescu-

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка

er's helmet. An algorithm for compensating for the distance between acoustic sensors on a rescuer's helmet, taking into account their location in the horizontal plane, has been developed. By means of calculation and theoretical studies, the basis for the practical creation of an acoustic device with an implemented algorithm that automatically corrects the distance measured by the sensors in front of and behind the rescuer's helmet to obtain accurate values of the distance to the obstacle and ensure effective navigation in emergency situations.

Keywords: acoustic device, sensor, acoustic resistance, configuration, visual control, interference

References

1. Zvit pro osnovni rezultaty diialnosti Derzhavnoi sluzhby Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii u 2022 rotsi. Available at: https://dsns.gov.ua/upload/1/6/4/9/3/5/0 /publicnii-zvit-2022-ostannia-versiia-1.pdf

2. Nakaz MVS vid 26.04.2018 № 340 «Pro zatverdzhennia Statutu dii u nadzvychainykh sytuatsiiakh orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu ta Statutu dii orhaniv upravlinnia ta pidrozdiliv Operatyvno-riatuvalnoi sluzhby tsyvilnoho zakhystu pid chas hasinnia pozhezh». Available at: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text

3. Ratushnyi, R. Loik, V. Synelnikov, O. Kovalchuk V. (2020). Orhanizatsiia avariino-riatuvalnykh robit. Lviv: Vydavnytstvo LDU BZhD, 394. Available at: https://books.ldubgd.edu.ua/index.php/ed/catalog/download/9 0/56/260-2?inline=1

4. Lievtierov, O. A., Statyvka, Y. S. (2022). Vyznachennia parametriv akustychnoho pryladu ekipiruvannia riatuvalnykiv. Problems of Emergency Situations, 2(36), 280–295. doi: 10.52363/2524-0226-2022-36-21

5. Bas, O., Lahno, D., Nozhko, I., Pelypenko, M. (2021). Vykorystannia ultrazvuku dlia oriientuvannia u zadymlenomu seredovyshchi. Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia, 1, 15–26. doi: 10.31731/2524-2636.2021.5.1.-15-26

6. Kaskapozhezhna. Tekhnichni vymohy. Zatverdzheno protokolom vid 23.06.2023 № 12. Available at: https://dsns.gov.ua/upload/1/8/2/3/0/8/1/kaska-pozezna-texnicni-vimogi-zatverdzeno-protokolom-vid-23062023-12docx.pdf

7. Hiremath, N., Kumar, V., Motahari, N., Shukla, D. (2021). An Overview of Acoustic Impedance Measurement Techniques and Future Prospects. Metrology, 17–38. doi: 10.3390/metrology1010002

8. Kirtskhalia, V. (2021). The dependence of the speed of sound in the Earth's atmosphere on its density and the correction of Mach's number. Ilia Vekua Sukhumi Institute of Physics and Technology. Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/1024/1/012037

9. Tei, K., Shimizu, R., Fukazawa, Y., Honiden, S. (2014). Model-Driven-Development-Based Stepwise Software Development Process for Wireless Sensor Networks. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 45, 675–687. doi: 10.1109/TSMC.2014.2360506

10. Teregulova, E. A. (2021). Features of the Passage of Acoustic Waves at Right Angle through a System of Layers of Multifractional Gas Suspensions. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2222–2225. doi: 10.1134/S1995080221090262

11. Choon, M., Sang, H. (2013). Propagation of acoustic waves in a metamaterial with a refractive index of near zero. Applied Physics Letters, 46–57. doi: 10.1063/1.4811742

12. Pozdieiev, S., Nuianzin, O., Sidnei, S., Shchipets, S. (2017). Computational study of bearing walls fire resistance tests efficiency using different combustion furnaces configurations. MATEC Web of Conferences, 116, 02027. doi: 10.1051/matecconf/201711602027

13. Wilk-Jakubowski, J. (2021). Analysis of Flame Suppression Capabilities Using Low-Frequency Acoustic Waves and Frequency Sweeping Techniques. Department of Information Systems. Kielce University of Technology, 5–8. doi: 10.3390/sym13071299

Надійшла до редколегії: 20.09.2023
Прийнята до друку: 07.11.2023

© О. А. Лєвтєров, Є. С. Стативка