

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

# ВІСНИК

## ЧЕРКАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Технічні науки  
Заснований у грудні 1996 р.

2/2023

### Редакційна колегія:

Al-Azzeh J., д-р філософії, доцент (Йорданія)  
Антонюк В. С., д-р техн. наук, професор  
Артемчук В. О., д-р техн. наук, с.н.с.  
Базіло К. В., д-р техн. наук, професор  
Батраченко О. В., д-р техн. наук, доцент  
Бондаренко М. О., д-р техн. наук, професор  
Бондаренко Ю. Ю., канд. техн. наук, професор  
Вамболь В. В., д-р техн. наук, професор  
Вашенко В. А., д-р техн. наук, професор  
Вітенько Т. М., д-р техн. наук, професор  
Вербицький С. Б., канд. техн. наук  
Вязовик В. М., д-р техн. наук, доцент  
Гальченко В. Я., д-р техн. наук, професор  
Гевод В. С., д-р хім. наук, доцент  
Зайчук О. В., д-р техн. наук, професор  
Заболотний С. В., д-р техн. наук, професор  
Iavich M., д-р філософії, професор (Грузія)  
Kažys R. J., д-р техн. наук, професор (Литва)  
Коваленко І. Л., д-р техн. наук, професор  
Лобода О. А., д-р хім. наук  
Лукашенко В. М., д-р техн. наук, професор  
Мусієнко М. П., д-р техн. наук, професор  
Осипенко В. І., д-р техн. наук, професор  
Палагін В. В., д-р техн. наук, професор  
Півоваров О. А., д-р техн. наук, професор  
Плахотний О. П., д-р техн. наук, доцент  
Прокопенко Т. О., д-р техн. наук, професор  
Ситник О. О., д-р техн. наук, професор  
Скиба М. І., канд. техн. наук, доцент  
Смотраєв Р. В., канд. техн. наук, доцент  
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор  
Сухенко В. Ю., д-р техн. наук, професор  
Уткіна Т. Ю., канд. техн. наук, доцент  
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор (*гол. ред.*)  
Федоров Є. Є., д-р техн. наук, професор  
Фролова Л. А., д-р техн. наук, професор  
Хоменко О. М., канд. хім. наук, доцент  
Яценко І. В., д-р техн. наук, професор

ЗАСНОВНИК І ВИДАВЕЦЬ – Черкаський  
державний технологічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію  
друкованого засобу масової інформації  
КВ № 6061 від 16.04.2002.

Виходить 4 рази на рік

### У ВИПУСКУ:

- АВТОМАТИЗАЦІЯ  
ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ
- ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
- ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ  
ТА ІНЖЕНЕРІЯ,  
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА
- МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО,  
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ  
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ  
І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

### Редакційна рада видання:

Григор О. О., д-р політ. наук, професор,  
ректор Черкаського державного  
технологічного університету (голова ради);  
Гончаров А. В., канд. техн. наук, професор,  
перший проректор ЧДТУ;  
Фауре Е. В., д-р техн. наук, професор,  
проректор з науково-дослідної роботи  
і міжнародних зв'язків ЧДТУ;  
головний редактор видання  
Столяренко Г. С., д-р техн. наук, професор;  
Литвин О. В., нач. ред.-видав. відділу ЧДТУ

### АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

ЧДТУ, к. 604/1, бульвар Шевченка, 460,  
м. Черкаси, 18006,  
тел. (0472) 51-15-89  
[vtn.chdtu.edu.ua](mailto:vtn.chdtu.edu.ua) (подання статей)

Тарасенко Я. В. (відповідальний секретар)  
e-mail: [vtn@chdtu.edu.ua](mailto:vtn@chdtu.edu.ua)

**2•2023**

**ВІСНИК**

**Черкаського державного  
технологічного університету**

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

**VISNYK**

**Cherkaskogo derzhavnogo  
tehnologichnogo universitetu**

**TECHNICAL SCIENCE**

**2 • 2023**

**Видання включене до Переліку  
наукових фахових видань України  
як фахове видання з технічних наук  
(спеціальності 101, 113, 121, 122, 123, 125,  
126, 131, 132, 133, 151, 152, 161, 172)  
категорія «Б»  
(накази МОНУ від 02.07.2020 №886,  
від 24.09.2020 №1188)**

**Видання зареєстровано  
у міжнародних наукометричних базах,  
каталогах і системах пошуку:**  
Index Copernicus Journals Master List,  
BASE, CiteFactor, Google Scholar, Crossref,  
Directory of Open Access Journals (DOAJ),  
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI),  
ResearchBib – Academic Resource Index,  
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat,  
Open Ukrainian Citation Index

**Електронна версія:**  
**[vtn.chdtu.edu.ua](http://vtn.chdtu.edu.ua); [visnyk.chdtu.edu.ua](http://visnyk.chdtu.edu.ua)**

Затверджено вченою радою  
Черкаського державного  
технологічного університету,  
протокол № 12 від 11.05.2023

За повного або часткового  
передрукування матеріалів  
посилання на «Вісник Черкаського  
державного технологічного  
університету» є обов'язковим.

## ЗМІСТ

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Bazilo C. V., Lavdanskyi A. O., Tuz V. V., Andriienko V. O., Voloshko O. V.</i> Software service for determining the parameters and characteristics of thin piezoelectric disk..... | 5  |
| <i>Панов А. О., Тимчук С. О.</i> Модель регулювання показників якості електроенергії в розподільних мережах 0,4-10 кВ.....                                                             | 13 |
| <i>Burmistrov S. V., Khotunov V. I., Zakharova M. V., Mykhaylyuta S. L., Liuta M. V.</i> Index method of minimization of Boolean functions.....                                        | 24 |
| <i>Хлівний В. В., Базіло К. В.</i> Вплив робочих параметрів гідроабразивного різання різноманітних матеріалів на точність дотримання ширини різку .....                                | 38 |

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Мірошник М. А., Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Пшеничний К. Ю., Мірошник А. М.</i> Модель обробки подій для моделювання пристроїв логічного керування реального часу ..... | 50 |
| <i>Санжаровський А. І., Юрчишин В. Я.</i> Модифікований метод виявлення фейкових новин на основі машинного навчання .....                                                 | 58 |
| <i>Кудряшова А. В.</i> Ранжування факторів впливу на якість реалізації післядрукарських процесів .....                                                                    | 71 |

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖЕНЕРІЯ,  
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Римар Т. Е.</i> Застосування НВЧ установок для спучення зернистих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла.....                                                                                           | 80  |
| <i>Козяр Н. М.</i> Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних речовин..... | 89  |
| <i>Данилкович А. Г., Сангінова О. В., Шахновський А. М.</i> Комп'ютерне моделювання та оптимізація складу гідрофобізуючої композиції .....                                                                               | 100 |
| <i>Михайловський Я. Е., Юхименко М. П., Острога Р. О.</i> Охолоджувальна кристалізація персульфату амонію в кристалізаторі з псевдозрідженим шаром.....                                                                  | 111 |
| <i>Ковбаса В. О.</i> Вплив технологічних параметрів та зовнішніх умов на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів .....                                             | 119 |
| <i>Косогіна І. В.</i> Транспортні властивості керамічних матриць на основі $Al_2O_3$ .....                                                                                                                               | 135 |

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО, ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ  
СУЧАСНИХ МАШИНОБУДІВНИХ І ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Костенко М. В., Шевельова А. Є., Гергель І. Ю., Лобода В. В.</i> Плоска деформація п'єзоелектричного біматеріалу з двома електропровідними електрично зарядженими міжфазними тріщинами ..... | 146 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## CONTENTS

### AUTOMATION AND CONSTRUCTION OF DEVICES

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Bazilo C. V., Lavdanskyyi A. O., Tuz V. V., Andriienko V. O., Voloshko O. V.</i> Software service for determining the parameters and characteristics of thin piezoelectric disk ..... | 5  |
| <i>Panov A. A., Tymchuk S. A.</i> Model for regulating electricity quality indicators in 0.4-10 kV distribution networks.....                                                            | 13 |
| <i>Burmistrov S. V., Khotunov V. I., Zakharova M. V., Mykhaylyuta S. L., Liuta M. V.</i> Index method of minimization of Boolean functions .....                                         | 24 |
| <i>Khlivnyi V. V., Bazilo C. V.</i> Influence of operating parameters of hydroabrasive cutting of various materials on the accuracy of observing the cutting width .....                 | 38 |

### INFORMATION TECHNOLOGIES

|                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Miroshnyk M. A., Shkil O. S., Rakhlis D. Yu., Pshenychnyi K. Yu., Miroshnyk A. M.</i> Event processing model for simulation of real-time logic control devices ..... | 50 |
| <i>Sanzharovskyyi A. I., Yurchyshyn V. Ya.</i> Modified method for detecting fake news based on machine learning algorithms .....                                       | 58 |
| <i>Kudriashova A. V.</i> Ranking of factors influencing the quality of implementation of post-printing processes .....                                                  | 71 |

### CHEMICAL TECHNOLOGIES AND ENGINEERING, ECOLOGICAL SECURITY

|                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Rymar T. E.</i> Application of microwave installations for swelling of granular thermal insulation materials based on liquid glass .....                                                                                                   | 80  |
| <i>Kozyar N. M.</i> Regularities of the influence of technological parameters and external factors on the speed and explosively unsafe combustion modes of pyrotechnic nitrate-metallized mixtures with additives of organic substances ..... | 89  |
| <i>Danylkovych A. H., Sanhinova O. V., Shakhnovskyyi A. M.</i> Computer simulation and optimization of the composition of the hydrophobising mixture .....                                                                                    | 100 |
| <i>Mykhajlovskyyi Ja. E., Yukhymentko M. P., Ostroga R. O.</i> Cooling crystallization of ammonium persulfate in a crystallizer with a pseudo-fluidized layer.....                                                                            | 111 |
| <i>Kovbasa V. O.</i> Influence of technological parameters and external conditions on the speed of development of the combustion process of pyrotechnic metallized mixtures based on fluoroplasts.....                                        | 119 |
| <i>Kosogina I. V.</i> Transport properties of ceramic matrices based on $Al_2O_3$ .....                                                                                                                                                       | 135 |

### MATERIALS SCIENCE, TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT OF MODERN MACHINE-BUILDING AND FOOD PLANTS

|                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Kostenko M. V., Sheveleva A. E., Gergel I. Yu., Loboda V. V.</i> Plane deformation of a piezoelectric bimaterial with two electrically conductive and charged interface cracks ..... | 146 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

JEL Classification Code C63

[0000-0002-1571-401X] **C. V. Bazilo**<sup>1</sup>, *Dr. Sc., Professor*,  
[0000-0002-1596-4123] **A. O. Lavdanskyi**<sup>1</sup>, *Ph. D., Associate Professor*,  
[0000-0003-2969-5080] **V. V. Tuz**<sup>1</sup>, *Ph. D., Associate Professor*,  
[0000-0003-3316-8101] **V. O. Andriienko**<sup>1</sup>, *Ph. D., Associate Professor*  
[0000-0002-1067-2615] **O. V. Voloshko**<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## SOFTWARE SERVICE FOR DETERMINING THE PARAMETERS AND CHARACTERISTICS OF THIN PIEZOELECTRIC DISK

*Disk piezoelectric devices are widely used in elements of information systems. The multiplicity and variety of practical applications of disk transducers naturally stimulate theoretical research, the purpose of which is to predict the characteristics and technical parameters of piezoelectronic devices created on their basis. The forecast is based on a mathematical model, which is the main result of a theoretical description of a real device.*

*The purpose of the study is to develop a service for determining the parameters and characteristics of a thin piezoelectric disk that oscillates radially.*

*The scientific novelty of the work lies in the development of the software service in the MATLAB programming language for determining the parameters and characteristics of a thin piezoelectric disk that oscillates radially, which allows to determine with high accuracy and adequacy the frequency dependence of electric impedance modulus, which allows to determine the frequencies of electromechanical resonance and anti-resonance of a thin piezoelectric disk.*

*The practical significance of the capabilities of the developed model, as well as the software tool for its implementation, lies in the experimentally confirmed results of the calculation of the main parameters of the piezoelectric disk transducer, which confirm the high accuracy and efficiency of such modeling, for the possibility of integration in information and measurement systems.*

**Keywords:** *piezoelectric disk element, physical processes, electrical impedance, oscillations, program service.*

**Introduction.** One of the most important issues that arise for the management of modern infrastructure is the need for timely and effective diagnostics of the state of its components. An insufficient level of diagnostics can lead to the need for costly repairs or emergency or even dangerous situations [1].

At the same time, ultrasonic diagnostics is one of the most effective methods for assessing the state of urban infrastructure [2]. To ensure sufficient quality of such diagnostics, it is necessary to develop and implement high-precision and reliable ultrasonic sensors. One of the key elements of such a sensor is a piezoelectric element designed to convert a mechanical energy into an electrical signal. However, the use of ultrasonic piezoceramic sensors as the main elements of a diagnostic device is currently limited by the poor knowledge of the influence of the operating parameters of these sensors on the accuracy and reliability of the diagnostic process [3].

Disk piezoelectric devices are widely used in elements of information systems [4-8]. Disks with sectorial surface electrodeposition are practically the main element of many microelectromechanical structures [9]. The multiplicity and variety of practical applications of disk transducers naturally stimulate theoretical research, the purpose of which is to predict the characteristics and technical parameters of piezoelectronic devices created on their basis.

At the same time, the use of mathematical modeling for the development of new ultrasonic diagnostic technologies can solve this problem and establish adequate patterns of the influence of operating parameters of such sensors on the accuracy and reliability of the diagnostic process.

The forecast is based on a mathematical model, which is the main result of a theoretical description of a real device. The practical significance of a mathematical model adequate to a real object is obvious. As a result of studying the mathematical model of a real device, it is possi-

ble to determine a set of geometric, physical, mechanical and electrical parameters of a real object, which ensures the implementation of technical indicators of a functional element of piezoelectronics, due to the technical problem. This significantly reduces the time and cost of developing new functional elements of piezoelectronics. The cost of saved resources is the commercial price of the mathematical model.

The ultimate goal of mathematical modeling of the physical state of oscillating piezoceramic elements is a qualitative and quantitative description of the characteristics and parameters of electric and elastic fields existing in them. It is quite clear that obtaining meaningful and reliable quantitative estimates of the parameters of the physical state of piezoelectric (piezoceramic) elements is not possible without reliable data on the values of physical and mechanical constants of materials [10].

Thus, it is necessary to build a consistent method for determining the material constants of piezoceramics, which delivers reliable values of at least three moduli of elasticity, two elements of the matrix of piezoelectric modules and one element of the permittivity matrix [11].

#### Purpose and objectives of the research.

Thus, the purpose of the study is to develop a service for determining the parameters and characteristics of a thin piezoelectric disk that oscillates radially.

To achieve this aim, it is necessary to solve the following objectives:

- Development of the "IPed" software service.
- Description of the main modes of operation of the developed software service.
- Experimental tests of the "IPed" software service.
- Analysis of the results of using the software service.

**Materials and methods.** Let's consider a disk (Figure 1), the thickness  $\alpha$  of which is many times smaller than the radius  $R$ . The surfaces of the disk  $z = 0$  and  $z = \alpha$  ( $z$  is the coordinate axis of the cylindrical coordinate system  $\rho, \varphi, z$ , the origin of which coincides with the center of the lower surface of the disk) are electroded – covered with a thin (no more than 10  $\mu\text{m}$ ) layer of silver. An electric potential  $U_0 e^{i\omega t}$  is applied to the top surface  $z = \alpha$  ( $U_0$  is the amplitude of the value of the electric potential;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  is the circular frequency;  $t$  is the time). The bottom

electroded surface  $z = 0$  is grounded, that is, it has zero potential.

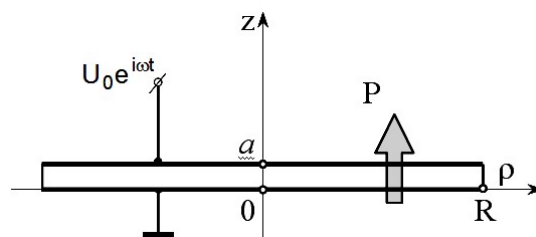


Figure 1. Calculation diagram of an oscillating piezoceramic disk

The electric potential difference applied to the disk creates an electric field in its volume, which displaces the ions of the disk from their equilibrium position. As a result of harmonically changing deformation of the disk in time, polarization charges arise in it. The resulting electric charge  $Qe^{i\omega t}$  on the surface  $z = \alpha$  with its electric field forms an electric current  $Ie^{i\omega t}$  in the conductor, which connects the surface  $z = \alpha$  with the output of the electric generator. At any moment of time,  $Ie^{i\omega t} = -\partial Q / \partial t = -i\omega Qe^{i\omega t}$ , that is, the amplitudes of the current and electric charge on the surface  $z = \alpha$  are connected by a linear relationship  $I = -i\omega Q$ .

It is obvious that the electrical impedance  $Z_{el}(\omega)$  of the oscillating disk must obey Ohm's law for a section of the circle, from which it follows that

$$Z_{el}(\omega) = \frac{U_0}{I} = -\frac{U_0}{i\omega Q}. \quad (1)$$

Medium frequencies will be called the frequency range in which the scale unit of spatial heterogeneity of the stress-strain state (length of the elastic wave) becomes proportional to the radius of the piezoceramic disk.

The research [12] gives the calculation of the electrical impedance of an oscillating disk, which can be written in the following form:

$$Z_{el}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_0^*} F^{(*)}(\omega), \quad (2)$$

where

$$F^{(*)}(\omega) = \frac{\lambda R J_0(\lambda R) - (1 - k) J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R) - (1 - k - 2K_{31}^2) J_1(\lambda R)}; \quad (3)$$

$K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11} \chi_{33}^*)$  is the square of the coefficient of electromechanical coupling of pie-

zoceramics in the regime of radial oscillations of a disk polarized along the thickness;  $C_o^* = \pi R^2 \chi_{33}^* / \alpha$  is a dynamic electric capacity of the piezoceramic disk for the mode of planar oscillations, i.e. electric capacity in the mid-frequency range;  $\chi_{33}^* = \chi_{33}^E (1 + \Delta \chi_{33}^*)$  is the dielectric constant for the mode of planar oscillations; additive  $\Delta \chi_{33}^* = e_{33}^2 / (\chi_{33}^E c_{33}^E)$  [12].

**Research results.** The program is designed to determine the parameters and characteristics of a thin piezoelectric disk that oscillates radially, in particular, the frequency dependence of the electric impedance module, which allows to determine the frequencies of electromechanical resonance and anti-resonance of a thin piezoelectric disk.

The algorithm of the developed service is shown in Figure 2.

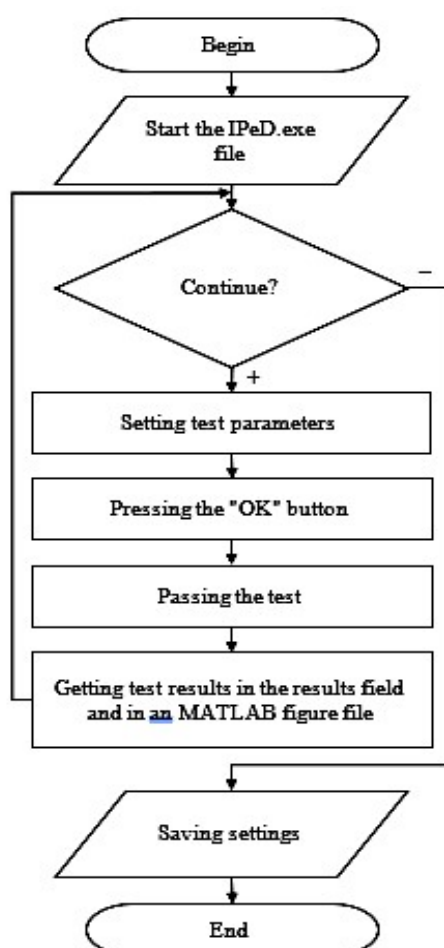


Figure 2. Algorithm of the "IPeD" software service

The developed software is implemented in the MATLAB programming language (Figure 3).

The user communicates with the computer through a graphical visualization interface.

To install the program, the user must run the IPeD\_web.exe program installation file and go through the program installation process (Figure 4).

In the future, to work with the program installed on the computer, the following steps are performed:

1. To start the program, you need to run the IPeD.exe file.

2. In the program interface (Figure 5, a), the user must specify the input parameters of the piezoelectric disk:

- the radius of the piezoelectric disc  $R$ , m;
- the thickness of the piezoelectric disk  $a$ , m (for a thin disk, the condition  $a/R \ll 1$  must be fulfilled);
- quality factor of piezoceramics  $Q$ ;
- density of piezoceramic material  $\rho_0$ , kg/m<sup>3</sup>;
- modules of elasticity  $c_{11e}$ ,  $c_{12e}$  and  $c_{33e}$ , Pa (when describing the radial oscillations of a piezoceramic disk polarized along the thickness, knowledge of the material constants, namely the modules of elasticity  $c_{11e}$ ,  $c_{12e}$ ,  $c_{13e}$  and  $c_{33e}$ , is required. Comparing the results of measuring the elastic modules  $c_{12e}$  and  $c_{13e}$ , it can be seen that they differ from each other by an amount that rarely exceeds the level of 0.3-0.5% of the nominal value. Therefore, the estimation of the numerical values of the modulus of elasticity can be carried out under the assumption that  $c_{12e} = c_{13e}$ );
- piezoelectric modules  $e_{33}$  and  $e_{31}$ , C/m<sup>2</sup>;
- dielectric constant  $\epsilon_0$ ,  $8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m.

Press the button «Ok».

An example of the program interface with entered input data is shown in Figure 5, b.

3. The program automatically opens the "Figure 1" window (Figure 6), where a graph of the dependence of the electrical impedance [Ohm] of the piezoelectric disk on the relative frequency value is displayed.

The calculation results can be saved in a \*.fig file by clicking "File" → "Save as".

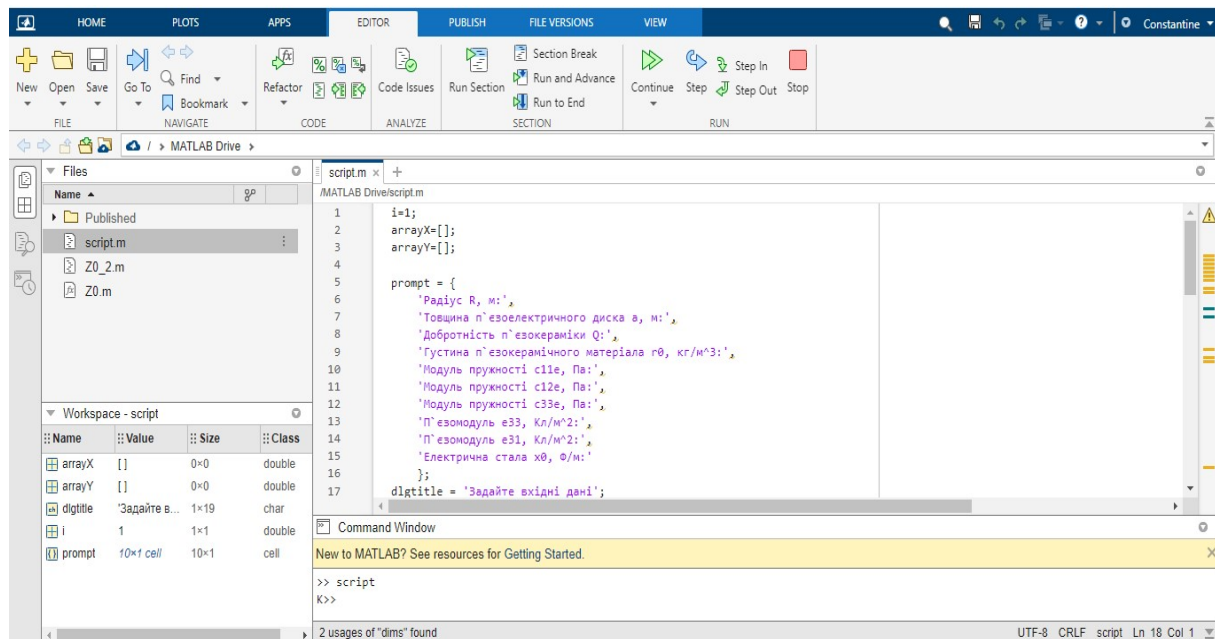


Figure 3. Fragment of a listing of a mathematical problem

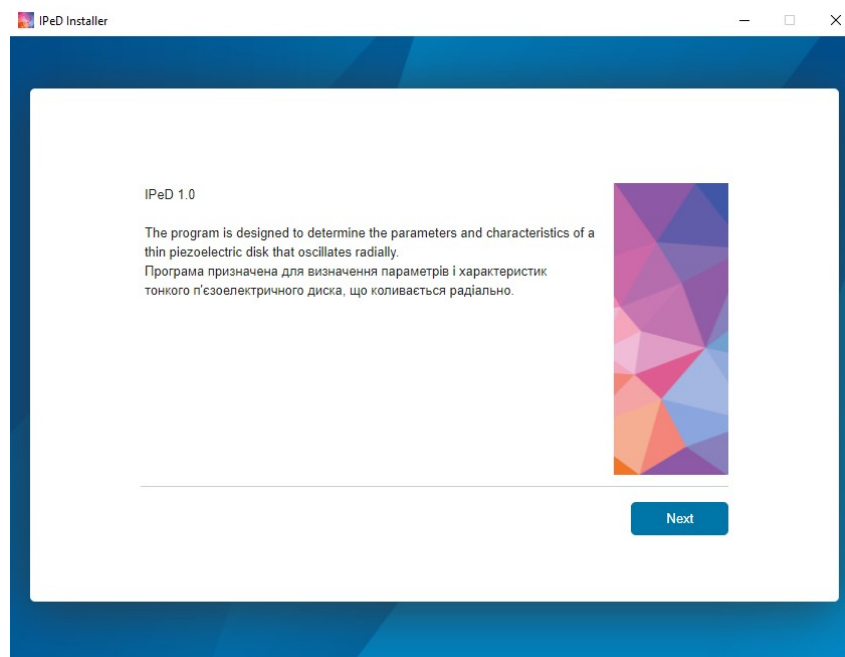


Figure 4. Program installation process

The method of experimental determination of the electrical impedance of a piezoceramic disk is considered in [13]. The scheme for conducting experimental research is shown in Figure 7.

Massive disks were used for experimental research. At the same time, the effects associated with the attached mass, which occurs in the pro-

cess of soldering conductors to the electroded surfaces [14] of the disk, are minimized.

When measuring the electrical impedance  $Z_{el}(\omega)$ , the disk was suspended in the air on thin threads in order to avoid mechanical contact with other objects.

Радіус R, м:

Товщина п'єзоелектричного диска a, м:

Добротність п'єзокераміки Q:

Густина п'єзокерамічного матеріала  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>:

Модуль пружності  $c_{11e}$ , Па:

Модуль пружності  $c_{12e}$ , Па:

Модуль пружності  $c_{33e}$ , Па:

П'єзомодуль  $e_{33}$ , Кл/м<sup>2</sup>:

П'єзомодуль  $e_{31}$ , Кл/м<sup>2</sup>:

Електрична стала  $\chi_0$ , Ф/м:

OK Cancel

Радіус R, м:

Товщина п'єзоелектричного диска a, м:

Добротність п'єзокераміки Q:

Густина п'єзокерамічного матеріала  $\rho_0$ , кг/м<sup>3</sup>:

Модуль пружності  $c_{11e}$ , Па:

Модуль пружності  $c_{12e}$ , Па:

Модуль пружності  $c_{33e}$ , Па:

П'єзомодуль  $e_{33}$ , Кл/м<sup>2</sup>:

П'єзомодуль  $e_{31}$ , Кл/м<sup>2</sup>:

Електрична стала  $\chi_0$ , Ф/м:

OK Cancel

Figure 5. IPeD program interface (a) and program interface with entered input data (b)

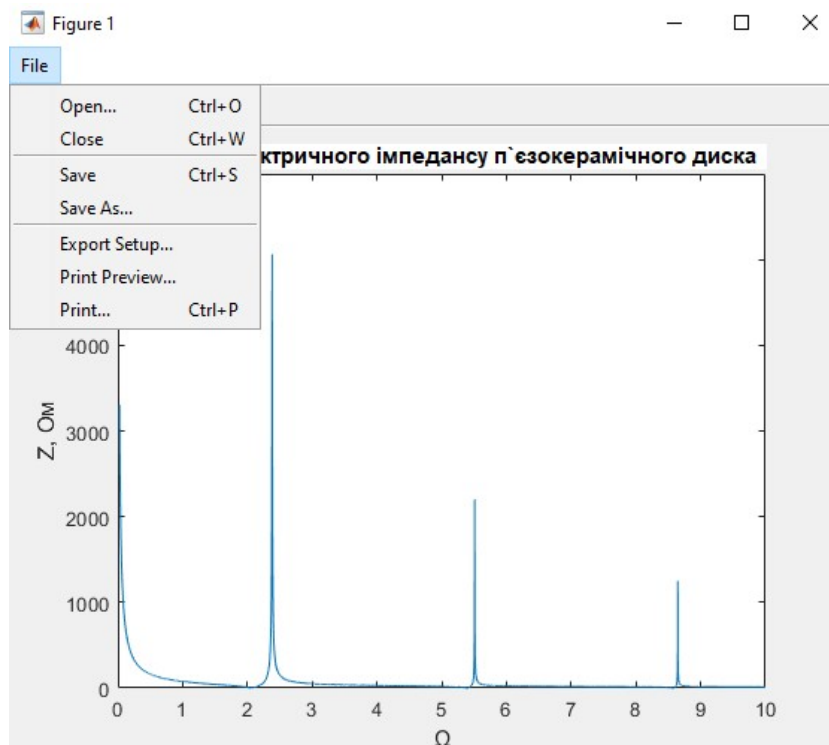
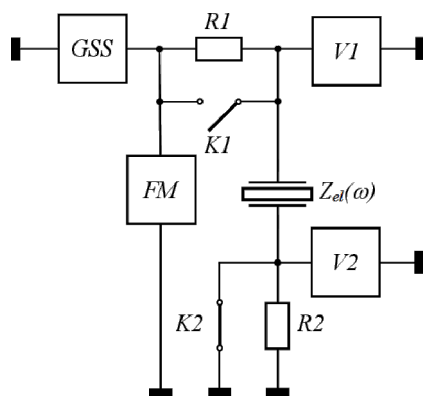


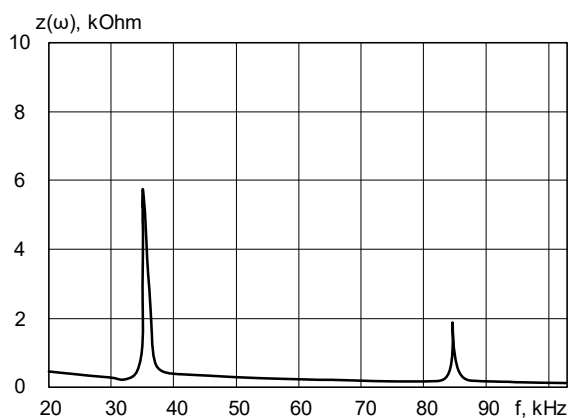
Figure 6. The modulus of the electric impedance of the disk in the area of medium frequencies



**Figure 7. Electrical scheme for measuring the electrical impedance of piezoceramic disk:** *GSS* is a generator of sinusoidal signals, *FM* is a frequency meter, *V1* and *V2* are voltmeters, *K1* and *K2* are mechanical keys, *R1* and *R2* are load resistors [14]

For experimental research, a disk piezoelectric element  $\varnothing 50 \times 1.2$  mm made of PZT-type (lead zirconate titanate) ceramics [15] was used.

The results of measuring the electrical impedance of the piezoelectric disk in the medium frequency range are presented in Figure 8.



**Figure 8. Electrical impedance of a piezoelectric disk in the medium frequency range**

**Discussion of results.** The value of the electrical impedance module in ohms is plotted on the ordinate axis, and the dimensionless wave number  $\Omega = \gamma R = \omega \tau_0$  is plotted on the abscissa axis (Figure 6), where  $\tau_0 = R/\nu$  is the time scale,  $\nu = \sqrt{c_{11}/\rho_0}$  is propagation speed of elastic disturbances in a thin disk. For the above parameter values  $\nu = 3153$  m/s and  $\tau_0 = 7.93 \cdot 10^{-6}$  s. A value

of  $\Omega = 1$  corresponds to a frequency of 20.072 kHz. The calculation of electrical impedance began with  $\Omega_0 = 0,025$ .

It is clearly visible that the electrical impedance of the disk at some frequencies acquires practically zero values (frequency of electromechanical resonance). With a relatively small increase in the frequency of the change in the sign of the stress-strain state, a sharp and very significant increase in the electric impedance modulus of the oscillating disk (frequency of electromechanical anti-resonance) is observed.

When comparing the results of mathematical modelling of the electrical impedance of a piezoelectric disk in the medium frequency range (Figure 6), performed according to expression (2), and the results of experimental measurements shown in Figure 8, it can be seen that the obtained estimate is in good agreement with the true value of the electrical impedance.

**Conclusions.** An expression for calculating the electrical impedance of an oscillating piezoceramic disk in the mid-frequency range is constructed, where the displacement vector of the material particles of the disk is almost completely determined by the radial component.

*The scientific novelty* of the work lies in the development of the software service in the MATLAB programming language for determining the parameters and characteristics of a thin piezoelectric disk that oscillates radially, which allows to determine with high accuracy and adequacy the frequency dependence of the electric impedance module, which allows to determine the frequencies of electromechanical resonance and anti-resonance of a thin piezoelectric disk.

*The practical significance* of the capabilities of the developed model, as well as the software tool for its implementation, lies in the experimentally confirmed results of the calculation of the main parameters of the piezoelectric disk transducer, which confirm the high accuracy and efficiency of such modeling, for the possibility of integration in information and measurement systems.

*In further research* it is planned to model and investigate the process of the occurrence of oscillations in piezoelectric transducers of various shapes.

## References

- [1] "Engineering: issues, challenges and opportunities for development". UNESCO Publishing, Paris, 2010. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189753>. Accessed on: March 14, 2023.
- [2] J. Zhu, J. B. Boxall, A. F. Hills, R. S. Dwyer-Joyce, S. R. Anderson, and R. P. Collins, "Assessing ground support of plastic pipes using ultrasound", *Infrastructures*, vol. 6, iss. 2, 2021.  
doi: 10.3390/infrastructures6020030
- [3] G. Tripathi, H. Anowarul, K. Agarwal, and D. K. Prasad, "Classification of micro-damage in piezoelectric ceramics using machine learning of ultrasound signals", *Sensors*, vol. 19, iss. 10, 2019.  
doi: 10.3390/s19194216
- [4] G. Piazza, P. J. Stephanou, and A. P. Pisano, "AIN contour-mode vibrating RF MEMS for next generation wireless communications", *MEMS*, 2006, pp. 906-909.
- [5] S. S. Li, Y. W. Lin, Y. Xie, and C. C. Nguyen, "1.51 GHz polydiamond micromechanical disk resonator with impedance-mismatched isolating support", in *Proc. 17th Int. IEEE MEMS Conf.*, Maastricht, The Netherlands, Jan. 25-29, 2004, pp. 821-824.
- [6] Y. W. Lin, S. S. Li, Z. Ren, and C. C. Nguyen "Third-order intermodulation distortion in capacitively-driven micromechanical resonators", in *IEEE Int. Ultrasonic Symposium*, Sept. 18-21, 2005, pp. 1592-1595.
- [7] V. Ya. Halchenko, S. A. Filimonov, A. V. Batrachenko, and N. V. Filimonova, "Increase the efficiency of the linear piezoelectric motor", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 4, 04025 (5 p.), 2018.  
doi: 10.21272/jnep.10(4).04025.
- [8] V. Ya. Halchenko, Yu. Yu. Bondarenko, S. A. Filimonov, and N. V. Filimonova, "Determination of influence of geometric parameters of piezoceramic plate on amplitude characteristics of linear piezomotor", *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, pp. 17-22, 2019.  
doi: 10.20998/2074-272X.2019.1.03.
- [9] V. K. Varadan, K. J. Vinoy, and K. A. Jose, "RF MEMS and their applications", John Wiley & Sons, Ltd., 2003.
- [10] C. V. Bazilo, "Research of electrical impedance of piezoelectric disk in middle frequencies area". *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 2, pp. 100-104, 2018 [in Ukrainian].
- [11] O. N. Petrishchev, and C. V. Bazilo, "Methodology of determination of physical and mechanical parameters of piezoelectric ceramics", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 9, no. 3, 03022 (6 p.), 2017.
- [12] O. N. Petrishchev, and C. V. Bazilo, "Principles and methods of mathematical modeling of oscillating piezoelectric elements", Gordienko Publ., Cherkasy, 2019 [in Ukrainian].
- [13] C. Bazilo, A. Zagorskis, O. Petrishchev, Y. Bondarenko, V. Zaika, and Y. Petrushko, "Modelling of piezoelectric transducers for environmental monitoring", in *10th Int. Conf. Environmental Engineering*, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2017.  
doi: 10.3846/enviro.2017.008.
- [14] V. Medanyk, Y. Bondarenko et al., "Research of current-conducting electrodes of elements from piezoelectric ceramics modified by the low-energy ribbon-shaped electron stream", *Journal of Nano- and Electronic Physics*, vol. 10, no. 6, 06012, 2018.  
doi: 10.21272/jnep.10(6).06012.
- [15] "What is PZT?" [Online]. Available: <https://www.americanpiezo.com/piezoelectric/pzt.html>. Accessed on: March 14, 2023.

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло**<sup>1</sup>, *д-р техн. наук, професор*,  
[0000-0002-1596-4123] **А. О. Лавданський**<sup>1</sup>, *канд. техн. наук, доцент*,  
[0000-0003-2969-5080] **В. В. Туз**<sup>1</sup>, *канд. техн. наук, доцент*,  
[0000-0003-3316-8101] **В. О. Андрієнко**<sup>1</sup>, *канд. техн. наук, доцент*,  
[0000-0002-1067-2615] **О. В. Волошко**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ПРОГРАМНИЙ СЕРВІС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ДИСКА

Одним із найважливіших питань, що виникають при управлінні сучасною інфраструктурою, є необхідність вчасної та ефективної діагностики стану її компонентів. Недостатній рівень діагностики може призвести до необхідності дорогих ремонтних робіт або аварійних чи навіть небезпечних ситуацій. Для забезпечення достатньої якості такої діагностики необхідно розроблювати і впроваджувати високоточні та надійні ультразвукові перетворювачі. Діскові п'єзoeлектричні пристрої широко використовуються в елементах інформаційних систем. Багатоманітність і різноманітність практичних застосувань дискових перетворювачів закономірно стимулюють теоретичні дослідження, метою яких є прогнозування характеристик і технічних параметрів створених на їх основі п'єзoeлектронних пристроїв. Прогноз базується на математичній моделі, яка є основним результатом теоретичного опису реального пристрою.

Метою дослідження є розробка сервісу для визначення параметрів і характеристик тонкого п'єзoeлектричного диска, що коливається радіально.

Наукова новизна роботи полягає в розробці програмного сервісу на мові програмування MATLAB для визначення параметрів і характеристик тонкого п'єзoeлектричного диска, що коливається радіально, що дозволяє з високою точністю та адекватністю визначати частотну залежність модуля електричного імпедансу, що дозволяє визначати частоти електромеханічного резонансу та антирезонансу тонкого п'єзoeлектричного диска.

Практичне значення можливостей розробленої моделі, а також програмного засобу для її реалізації полягає в експериментально підтверджених результатах розрахунку основних параметрів п'єзoeлектричного дискового перетворювача, які підтверджують високу точність і ефективність такого моделювання, для можливості інтеграції в інформаційно-вимірвальні системи.

**Ключові слова:** п'єзoeлектричний дисковий елемент, фізичні процеси, електричний імпеданс, коливання, програмне забезпечення.

УДК 621.395.664

[0000-0002-0688-1430] **А. О. Панов**, аспірант,

e-mail: panovanton1994@gmail.com

[0000-0002-8600-4234] **С. О. Тимчук**, д-р техн. наук, професорДержавний біотехнологічний університет  
вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, Україна

## МОДЕЛЬ РЕГУЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ 0,4-10 кВ

Споживання енергії є обов'язковою умовою існування людства. Наявність доступної для споживання енергії завжди була необхідною для задоволення потреб людини, збільшення тривалості та поліпшення умов її життя. Тема якості електроенергії є головною в Україні. Найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити подавання номінальної напруги до всіх споживачів практично не можливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження електричного струму по електричній мережі пов'язане із втратами напруги. Ці втрати не залишаються незмінними, оскільки навантаження мережі постійно змінюється протягом доби, сезону, року. Внаслідок зміни навантаження змінюється і втрата напруги в мережі і, як наслідок, змінюється напруга на затискачах у споживачів. Ці зміни можуть бути швидкими і короточасними (наприклад під час пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження протягом доби або року і при плавному регулюванні напруги).

В роботі наведено результати дослідження застосування чітких алгоритмів керування для завдання нормалізації якості напруги та коефіцієнтів несиметрії в електромережі. На основі моделювання запропоновано нову ефективну модель алгоритму регулювання якості електричної енергії в розподільній мережі. У дослідному зразку використовується нове технічне рішення стосовно регулювання показників якості електроенергії.

Розроблено модель регулювання якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки і побудови блок-схеми алгоритму. Розроблена структурна схема випробувальної системи «Релсіс РЗЛ-05.РПН».

Результати досліджень можуть бути використані при проектуванні пристрою для приводу з регулюванням під навантаженням (РПН), підключеного до трансформатора.

**Ключові слова:** енергетика, відхилення напруги, несиметрія напруги, нечітка логіка, автоматизація, регулювання під навантаженням.

**Вступ.** Однією з важливих вимог до електропостачання є забезпечення якості електроенергії, під яким розуміють ступінь відповідності показників якості прийнятим нормам. Відхилення напруги та інших показників якості від встановлених норм суттєво впливає на роботу електрифікованого обладнання та електричних мереж, що призводить до електромагнітної та технологічної складової економічної шкоди. Також однією з актуальних проблем трифазних електричних мереж напруги 0,4 кВ є несиметрія напруги. Несиметрія напруги виявляється у нерівності між собою моделей векторів фазних напруг і кутів зсуву з-поміж них.

ДСТУ EN 50160:2014 [1] номінується відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії. Нормально допустимі і

гранично допустимі значення відхилення напруги, що встановилися, дорівнюють відповідно  $\pm 5\%$  і  $\pm 10\%$  від номінального значення напруги і в точках загального приєднання споживачів електричної енергії повинні бути встановлені в договорах енергопостачання для годин мінімуму і максимуму навантажень в енергосистемі з огляду на необхідність виконання норм стандарту на виводах приймачів електричної енергії відповідно до нормативних документів.

Найефективніше споживачі електричної енергії працюють при номінальній напрузі. Проте забезпечити подавання номінальної напруги до всіх споживачів практично не можливо. Всякий провідник має певний опір, тому проходження електричного струму по електричній мережі пов'язане із втратами напруги.

Ці втрати не залишаються незмінними, оскільки навантаження мережі постійно змінюється протягом доби, сезону, року і т. д. [2].

Внаслідок зміни навантаження змінюється і втрата напруги в мережі і, як наслідок, змінюється напруга на затискачах у споживачів [3]. Ці зміни можуть бути швидкими і короточасними (наприклад під час пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором) або повільними і тривалими (при поступовій зміні навантаження протягом доби або року і при плавному регулюванні напруги) [4].

Несиметрія напруги є одним із показників, за яким оцінюють якість електричної енергії у трифазних електричних мережах напруги 0,4-10 кВ відповідно до ДСТУ EN 50160:2014. За цими нормами коефіцієнт несиметрії напруги призводить до різкого зниження ефективності трифазних асинхронних двигунів, при тому що більшість промислових підприємств працюють тільки на асинхронних двигунах. Тому несиметрію напруг слід ретельно вивчати та контролювати.

Несиметрія напруги в електричних мережах підприємств обумовлена наявністю потужних однофазних навантажень і трифазних, споживачів, які тривало працюють у несиметричному режимі. Також трифазна система напруги може бути несиметрична під час живлення електромережі від тягової підстанції змінного струму.

При несиметрії напруги в трифазних мережах з'являються додаткові втрати в елементах електромереж, скорочується термін електрообладнання та знижуються економічні показники його роботи. Також при несиметрії напруги в електричних машинах змінного струму виникають магнітні поля, що обертаються не лише з синхронною швидкістю у напрямку обертання ротора, але й з подвійною синхронною швидкістю в протилежному. В результаті цього виникає гальмівний електромагнітний момент, а також додатковий нагрів активних частин машини, головним чином ротора, за рахунок струмів подвійної частоти [5].

В асинхронних двигунах при коефіцієнтах зворотної послідовності напруги  $K_{2U}$  0,05-0,06 зниження обертового моменту є досить малим, тому ним можна знехтувати. Проте вплив несиметрії на втрати в електродвигуні й, отже, нагрів і скорочення терміну служби ізоляції двигуна проявляються значно сильніше.

При роботі асинхронного двигуна з номінальним обертовим моментом і коефіцієнтом зворотної послідовності напруги, що дорівнює 4 %, термін служби ізоляції його скорочується приблизно в два рази тільки за рахунок додаткового нагріву. Якщо напруга на одній із фаз значно перевищуватиме номінальне значення, скорочення терміну служби ізоляції буде ще більшим.

Взаємний вплив показників якості електроенергії проявляється різною мірою. Несинусоїдальність напруги практично не впливає на інші показники. Винятком є випадок роботи регуляторів напруги, не захищених від проникнення вищих гармонік; у цьому випадку збільшуються похибки регулювання та як наслідок зростають відхилення напруги порівняно з установочними або оптимальними значеннями. З практики відомо, що не слід обмежувати реактивну потужність турбогенераторів блок-станцій, а також синхронних електродвигунів і спеціальних швидкодіючих синхронних компенсаторів навіть при дуже великому рівні гармонік. В останні роки конденсатори в мережах з нелінійними навантаженнями використовують в схемах силових резонансних фільтрів або в поєднанні із захисним реактором і вони виявляються цілком сумісними з іншими нелінійними навантаженнями [6].

Економічні збитки в електричних мережах суттєво залежать від якості електроенергії. І одними з головних факторів, які погіршують якість електричної енергії в електроприймачах в електричних мережах 0,4-10 кВ, є усталене відхилення напруги і несиметрія напруги за зворотною і нульовою послідовністю. Наявність відхилення напруги і несиметрії навантажень знижує пропускну властивість елементів електричної мережі, спотворення режимів напруги, які погано впливають на режими роботи споживачів електричної енергії і також впливає на технічно-економічні показники. Як показали дослідження авторів [6], коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю становить 5-12 % при нормальному і гранично допустимому значенні 2 % і 4 % відповідно. В [7] доведено, що 1 % напруги нульової послідовності відповідає 0,9 % додаткового відхилення напруги. Для визначення економічної доцільності будь-яких заходів з поліпшення якості електричної енергії необхідно знати, крім типових сталих витрат (зарплатні обслуговуючого і ремонтного персоналу, амортизаційних відрахувань,

витрат на поточний ремонт тощо), величину збитків, які зумовлені роботою електроприймачів зі зниженою якістю електричної енергії.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є розробка моделі, яка виконує регулювання якості електричної енергії, а саме таких показників електроенергії, як усталене відхилення напруги та коефіцієнти несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю.

Для побудови моделі регулювання якості електричної енергії необхідно виконати такі задачі: розробити блок-схему алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги; розробити блок-схему алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною і нульовою послідовністю в електричних мережах.

**Виклад основного матеріалу.** На основі аналізу і розробки методу регулювання якості електричної енергії за рахунок алгоритму керування на основі нечіткої логіки, представленого у статті [8], оцінку гармонічних складових напруги краще проводити модернізованим методом кореляційних функцій.

Як база для нового алгоритму був використаний розділ математики, який є узагальненням класичної логіки і теорії множин [9], що базується на понятті нечітких множин, введених як об'єкт з функцією належності елемента до множин, які застосовують будь-які значення в інтервалі  $[0;1]$ . Це забезпечує високу точність оцінки гармонічних складових напруги.

Для розробки нечіткого алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги вхідними параметрами системи нечіткого виведення були взяті нечіткі змінні, тобто відповідальні за фазу напругу, і сам пристрій приводу з регулюванням під навантаженням (РПН): "Фаза А", "Фаза В", "Фаза С" і "Положення пристрою РПН". Також вихідними параметрами системи були взяті нечіткі змінні, такі як: "Переключення пристрою РПН", "Відключення частини навантаження" і "Включення додаткового навантаження".

Для нечітких змінних були написані такі терм-множини:

$$T_u = \{ "U_{A low}", "U_{A mid}", "U_{A high}" \};$$

$$T_u = \{ "U_{B low}", "U_{B mid}", "U_{B high}" \};$$

$$T_u = \{ "U_{C low}", "U_{C mid}", "U_{C high}" \}.$$

Функції належності термів множин  $T_u$  обрані відповідно до норм стандарту і виглядають таким чином:

$$\mu_{\delta U_{yL}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{0,95U_{ном} - U}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (1)$$

$$\mu_{\delta U_{yM}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{U - 0,9U_{ном}}{0,05U_{ном}}, \frac{1,1U_{ном} - U}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (2)$$

$$\mu_{\delta U_{yH}} = \max \{ 0, \min \{ 1, \frac{U - 1,05U_{ном}}{0,05U_{ном}} \} \}; \quad (3)$$

Це функція належності показників усталеного відхилення, які описують низький, середній та високий ступені відхилення від потреб норм та стандартів.

Як терм-множини для нечіткої змінної "Положення пристрою РПН" були написані:

$$T_p = \{ "РПН_{min}", "РПН_{max}" \}.$$

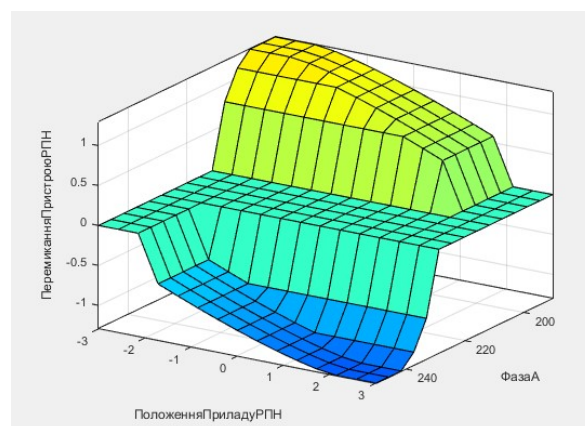
Для написання терм-множин для нечіткої вихідної змінної для таких показників, як "Перемикання пристрою РПН", "Відключення часткового навантаження" та "Включення додаткового навантаження" вони виглядають таким чином:

$$T_n = \{ "РПН-", "РПН+" \};$$

$$T_o = \{ "ВІДКЛ.навантаження" \};$$

$$T_v = \{ "ВКЛ.навантаження" \}.$$

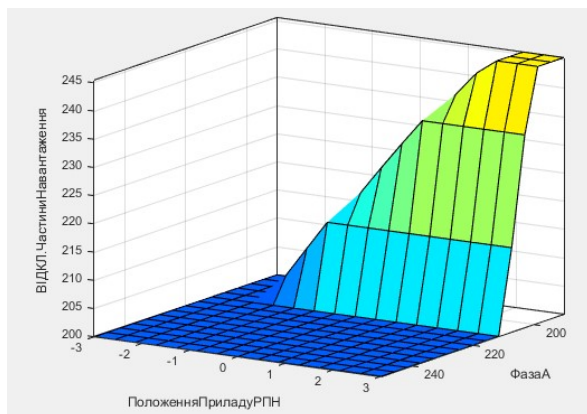
Після задання правил нечіткого виведення в інструментарії "Fuzzy Logic Toolbox" в пакеті програми MATLAB отримаємо результат для вихідної змінної показника "Перемикання пристрою РПН" при конкретних значеннях вхідних змінних, що зображено у вигляді графічного інтерфейсу на рисунку 1.



**Рисунок 1. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Перемикання пристрою РПН"**

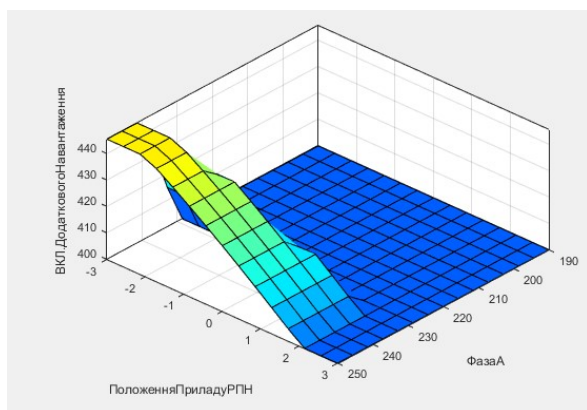
Так само будується графічний інтерфейс після отримання результатів для вихідної змінної показника "Відключення часткового навантаження" при інших значеннях

вихідної змінної однієї з трьох фаз, який зображено на рисунку 2.



**Рисунок 2. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Відключення часткового навантаження"**

Аналогічно будується графічний інтерфейс для вихідної змінної показника "Включення додаткового навантаження" (рисунок 3).



**Рисунок 3. Графік інтерфейсу перегляду поверхні нечіткого виведення для "Включення додаткового навантаження"**

Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення показує, що при зміні напруги на одній із трьох фаз буде перемикається пристрій РПН на потрібне положення. При зміні напруги на двох фазах буде вмикається додаткове навантаження або вимикається частина навантаження.

Коефіцієнти несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності "K<sub>2U</sub>" і "K<sub>0U</sub>" представляються у нечіткій формі, як це запропоновано у [10, 11], а вихідним параметром є нечітка змінна "Включення пристрою комутації", як це наведено у [12, 13].

Як терм-множини для нечіткої змінної "Коефіцієнт несиметрії напруги при зворотній послідовності" використовуються множини  $Tk = \{ "K_{2Un}", "K_{2Uh}" \}$ .

Так само як терм-множина для нечіткої змінної "Коефіцієнт несиметрії напруги при нульовій послідовності" використовується множина  $Tk = \{ "K_{0Un}", "K_{0Uh}" \}$ .

Функції належності терм-множин  $Tk$  обрані відповідно до норм стандартів і мають такий вигляд:

$$\mu K_{2Un} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\}; \quad (4)$$

$$\mu K_{2Uh} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}; \quad (5)$$

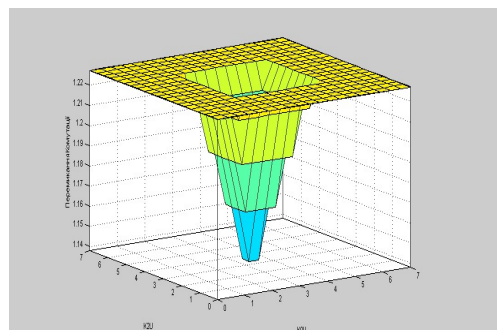
$$\mu K_{0Un} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{5-k}{3} \right\} \right\}; \quad (6)$$

$$\mu K_{0Uh} = \max \left\{ 0, \min \left\{ 1, \frac{k-2}{3} \right\} \right\}. \quad (7)$$

При цьому кожен із термів перших двох змінних оцінюється за шкалою коефіцієнта несиметрії від 0 % до 5 %.

Для нечіткої вихідної змінної "Перемикавання комутації" використовується множина  $To = \{ "ПК" \}$ .

Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення (рисунок 4) показує, що при зміні коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній і нульовій послідовності буде здійснюватись комутація. Асиметрія по зворотній, так само і по нульовій послідовності вирішується однаково, тобто за допомогою трансформаторної підстанції, яка укомплектована пристроєм РПН, що має змогу зміни комутації споживача до фаз, тобто перемикавання комутації споживачів між фазами.



**Рисунок 4. Графічний інтерфейс перегляду поверхні нечіткого виведення для "Перемикавання комутації"**

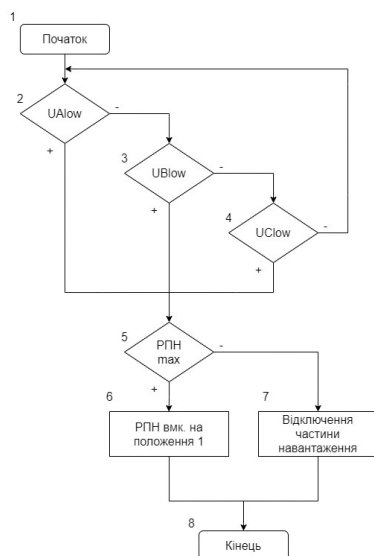
Після чого розробка блок-схеми алгоритму програмного регулювання усталеного відхилення напруги здійснюється на основі нечіткої логіки. Для побудови запишемо правило логічного виведення для нормалізації усталеного відхилення напруги в одній із фаз, які допоможуть більш детально описати блок-схему.

*if (UAlow or UBlow or UClow) and not РПНmax  $\rightarrow$  РПН+.*

*if (UAlow or UBlow or UClow) and РПНmax  $\rightarrow$  ВІДКЛ.ЧастиниНавантаження.*

У розроблених блок-схемах алгоритму регулювання передбачений контроль спрацювання всіх механізмів у ході нормалізації напруги, а при порушенні послідовності роботи, заданої алгоритмом, або при неспрацюванні якого-небудь механізму передбачене відпрацювання алгоритму аварійних ситуацій, який передбачає зупинку робочих приводів і механізмів та включення сигналізації аварійного режиму роботи.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на одній із трьох фаз зображено на рисунку 5 [14].



**Рисунок 5. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на одній із трьох фаз, здійснена на основі нечіткої логіки**

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, що здійснює вмикання

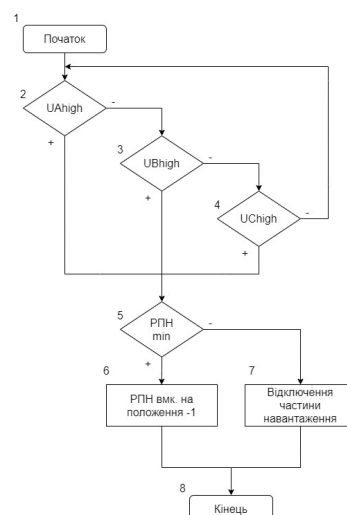
приводу РПН на положення 1. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 є активним, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, після чого вмикається РПН на положення 1. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і блок 5 не є активним, то керування переходить до блока 6, який вмикає РПН на положення 1.

Якщо блок 2 активний і блок 5 також є активним, то керування переходить до блока 7, який здійснює відключення частини навантаження. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, який відключає частину навантаження. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, що відключає частину навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на одній із трьох фаз, побудований на основі нечіткої логіки і правил логічного виведення, зображено на рисунку 6.

*if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and not РПНmin  $\rightarrow$  РПН-.*

*if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and РПНmin  $\rightarrow$  ВКЛ.Навантаження.*



**Рисунок 6. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на одній із трьох фаз, здійснена на основі нечіткої логіки**

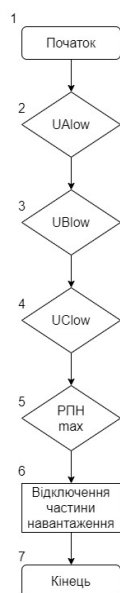
Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, що здійснює вмикання

приводу РПН на положення -1. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 є активним, і при цьому не активний блок 5, то керування переходить до блока 6, після чого вмикається РПН на положення -1. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і блок 5 не є активним, то керування переходить до блока 6, який вмикає РПН на положення -1.

Якщо блок 2 активний і блок 5 також є активним, то керування переходить до блока 7, який здійснює вмикання навантаження. Якщо блок 2 не активний, а блок 3 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, який вмикає навантаження. Якщо блок 3 не активний, а блок 4 активний, і при цьому блок 5 є активним, тоді керування переходить до блока 7, що вмикає навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на усіх трьох фазах, що побудований на основі нечіткої логіки, де представлено правила логічного виведення, зображено на рисунку 7.

*if (UAlow or UBlow or UClow) and РПНmax → Відкл.ЧастиниНавантаження.*



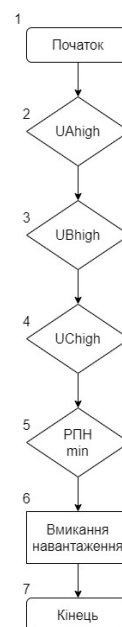
**Рисунок 7. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при низькій напрузі на усіх трьох фазах, здійснена на основі нечіткої логіки**

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, активний блок 3, активний блок 4 і активний

блок 5, тоді керування переходить до блока 6, який здійснює відключення частини навантаження.

Алгоритм програмного регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на усіх трьох фазах, що побудований на основі нечіткої логіки, де представлено правила логічного виведення, зображено на рисунку 8.

*if (UAhigh or UBhigh or UChigh) and РПНmin → Вкл.Навантаження.*



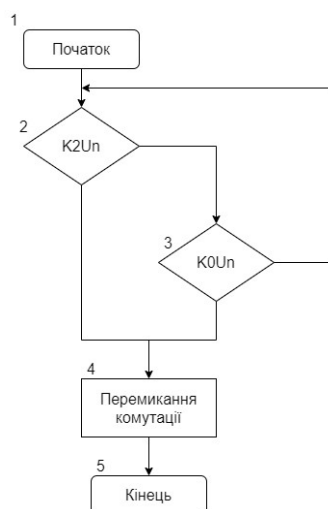
**Рисунок 8. Блок-схема алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги при високій напрузі на усіх трьох фазах, здійснена на основі нечіткої логіки**

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, активний блок 3, активний блок 4 і активний блок 5, тоді керування переходить до блока 6, який здійснює вмикання навантаження.

Наступна розробка блок-схеми алгоритму програмного регулювання буде пов'язана з регулюванням коефіцієнта несиметрії напруги зворотної і нульової послідовності, що здійснено на основі нечіткої логіки. Для побудови запишемо правило логічного виведення для нормалізації коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії, що допоможе більш детально описати блок-схему

*if (K2Un or K0Un) then "ПК".*

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії зображено на рисунку 9.



**Рисунок 9. Блок-схема алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при нормальному відсотку несиметрії**

Алгоритм програмного регулювання виглядає таким чином: якщо активний блок 2, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації. Якщо блок 2 є не активним, і при цьому блок 3 є активним, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації.

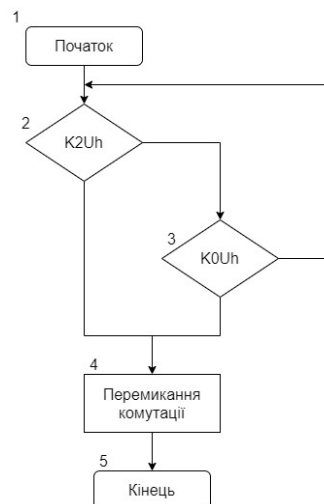
Для побудови блок-схеми запишемо правило логічного виведення для нормалізації коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії

*if (K2Uh or K0Uh) then "ПК".*

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії зображено на рисунку 10.

Алгоритм програмного регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії буде описуватися так само, як і при нормальному відсотку несиметрії, тобто, якщо активний блок 2, тоді керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації. Якщо блок 2 є не активним, і при цьому блок 3 є активним, тоді

керування переходить до блока 4, який здійснює включення перемикавання комутації.



**Рисунок 10. Блок-схема алгоритму регулювання коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю при високому відсотку несиметрії**

**Результати досліджень.** Дослідження відбувається за допомогою пристрою РЗЛ-05.РПН фірми "Релсіс" [15], який призначений для виконання функції управління електроприводом РПН двох- або трьохобмотувального силового трансформатора під навантаженням при автоматичному, дистанційному і місцевому регулюванні напруги трансформатора шляхом зміни коефіцієнтів трансформації, контролю рівня напруги і підтримки його в заданих уставках межах шляхом формування команди управління виконавчим пристроєм (приводом РПН) і контролю його роботи; реалізації логіки необхідних блокувань і функцій захисту. Пристрій РЗЛ-05.РПН забезпечує індикацію поточного положення РПН (номери ступеня). Уставка "Уставки" → "РПН" → "Ступінь РПН" задає поточний ступінь положення приводу від 1 до 100. Уставка необхідна для синхронізації положення внутрішнього програмного лічильника поточного ступеня з реальним положенням приводу. Поточний рівень РПН також можна задати за допомогою кнопок "Додати" та "Зменшити" на передню пам'ять (ПП). Для цього необхідно параметр "Управління з ПП" встановити у положення "Початкова позиція" та за допомогою кнопок додавати або зменшувати значення поточного ступеня, контролюючи пункт меню "Поточний ступінь РПН". Цей режим керує лише лічильником поточного ступеня. Після закінчення налаштування параметра

"Керування з РПН" слід повернутися в попередню позицію. Уставка "Уставки" → "РПН" → "Початковий ступінь РПН" задає початковий дозволений ступінь регулювання від 0 до 99. Якщо поточний ступінь РПН буде меншим, ніж "Початковий ступінь РПН -1", то видаватиметься сигналізація на реле К12 "Лічильник менше", на реле К7 "Сигналізація" та на СДІ12 "Збіг лічильника". Функція потрібна для видачі сигналізації при досягненні поточного рівня РПН деякого значення при зменшенні. Значення повернення для початкового ступеня задається уставкою "Початковий ступінь РПН", воно має бути більшим за значення уставки "Початковий ступінь РПН-1" на одиницю. Уставка "Уставки" → "РПН" → "Кінцевий ступінь РПН +1" задає кінцевий дозволений ступінь регулювання від 1 до 100. Якщо поточний ступінь РПН буде більшим, ніж "Кінцевий ступінь РПН +1", то видаватиметься сигналізація на реле К11 "Лічильник більше", на реле К7 "Сигналізація" та на СДІ12 "Збіг лічильника". Функція потрібна для видачі сигналізації при досягненні поточного рівня РПН деякого значення при додаванні. Значення повернення для кінцевого ступеня задається уставкою "Кінцевий ступінь РПН", воно має бути меншим за значення уставки "Кінцевий ступінь РПН +1" на одиницю. Уставки ступенів РПН задаються за допомогою програми "Монітор-2", автоматизованої системи керування, а також за допомогою команд на передній панелі. При регулюванні напруги (автоматичному, ручному) поточний ступінь РПН розраховується пристроєм на основі введеної уставки поточного положення, що відповідає реальному положенню приводу та відпрацьованих команд перемикачів. Поточний стан РПН передається до автоматизованої системи керування через інтерфейс RS-485.

На електронно-обчислювальній машині задаються необхідні режими роботи, після чого розраховуються і виробляються цифрові вибори струмів і напруги. Ці вибори передаються в "Релсіс РЗЛ-05.РПН". Цифро-аналогові перетворювачі масштабують цифрові вибірки, що надійшли, і формують аналогові сигнали напруги. Одним із модулів програмного забезпечення "РЗЛ-05.РПН" є кореляція рівня регульованої напруги по струму навантаження. У цьому випадку програма дає можливість запрограмувати сигнал програми каналу за формулою. У пристрої "РЗЛ-05.РПН" реалізована струмова компен-

сація з можливістю вибору трьох формул ("Уставка" → "Регулювання каналу n" → "Формула n"). Якщо при аналізі струмів і напруги граничні умови не порушені, тоді повертається вираз:

$$U_{np} \uparrow < U_{тек} < U_{np} \downarrow; \quad (8)$$

де

$$U_{np} \uparrow = U_{взгн} + U_{к1}; \quad (9)$$

$$U_{np} \downarrow = U_{взгн} + U_{к1}, \quad (10)$$

де  $U_{np}$  – розрахункові значення напруги підтримки;  $U_{тек}$  – поточне значення напруги в регульованій секції;  $U_{к1}$  – розрахункове значення напруги компенсації;  $U_{взгн}$  – установка нижньої межі при регулюванні напруги вгору (додати);  $U_{взгн}$  – установка нижньої межі при регулюванні напруги вниз (зменшити).

Після вибору необхідних каналів та їх налаштування панель графічного відображення набуде вигляду, зображеного на рисунку 11. При відкритті на панелі відображається уся довжина ліченої осцилограми і всі вибрані канали.

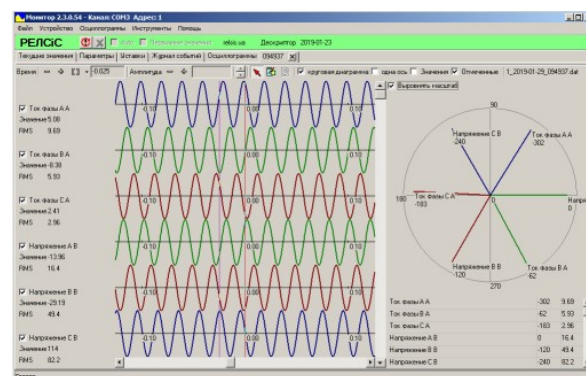


Рисунок 11. Кругова діаграма

**Обговорення результатів.** Як видно на рисунку 11, при зміні навантаження на одній із фаз перемикачтиметься на потрібні положення пристрій РПН, а при зміні напруги двох фаз буде включатися додаткове навантаження або відключатися частина навантаження. Цей аналіз дозволяє встановити більш точне регулювання напруги на одній або на всіх фазах мережі. Після варіювання вхідних змінних визначається адекватність цієї розробленої нечіткої моделі. Ця модель ефективна тим, що команда, що управляє, може бути видана не за фактом порушення норм відхилення напруги, як це реалізовано в існуючих системах, а заздалегідь, оскільки функції належності термів перетинаються (рисунки 1).

Представлена модель дозволяє з легкістю отримувати дані для обробки, після обробки, за допомогою цих даних автоматизовано вибирати потрібний метод регулювання та керування усталеним відхиленням напруги. Ця система також підходить для регулювання інших показників якості електричної енергії в розподільних мережах 0,4-10 кВ. Тобто можна розглянути такий показник якості електроенергії, як коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною і нульовою послідовністю в електричних мережах, де буде застосовуватися перемикання комутації для коефіцієнтів несиметрії.

**Висновки.** Проаналізовано існуючі методи регулювання якості електричної енергії. Виявлено недоліки та проблеми питання, пов'язаного з підвищенням якості електроенергії.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні моделі регулювання показників якості електричної енергії на основі методу нечіткої логіки.

Практична цінність роботи полягає в такому:

- побудована модель за допомогою методу нечіткої логіки дозволяє прискорити узгодження трансформатора з РПН зі схемою керування та встановити більш точне регулювання напруги, що підвищить ефективність роботи трансформатора та самої системи;

- результати роботи можуть бути використані при проектуванні підстанції для впровадження в енергосистему.

Подальші дослідження авторів можуть бути спрямовані на розробку схем керування трансформаторів з РПН та створення моделей на ПЛІС для реалізації більш детальних цілочисельних обчислень.

#### Список використаних джерел

- [1] ДСТУ EN 50160:2014, "Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності". Взамін ДСТУ EN 20160:2010; Введ. 20.05.2014. Київ: Мінекономіки України, 2014.
- [2] П. Плешков, М. Полтовець, та І. Савеленко, *Оцінка економічних збитків при несиметрії напруги за нульовою послідовністю в сільських електричних мережах*. Кіровоград: КДТУ, 2002, с. 69-72.
- [3] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, *Power Quality Problems and New Solutions*. [Online]. Available: <http://www.icrepq.com/pdfs/PL4.ALMEDIA.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [4] О. Г. Гриб, О. М. Довгалюк, та О. В. Сапrika, "Аналіз відхилення напруги в електричних мережах внутрішнього освітлення" [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.kdu.edu.ua/stat/Tezi/Daidzhest/2011/02\\_01\\_.pdf](http://www.kdu.edu.ua/stat/Tezi/Daidzhest/2011/02_01_.pdf). Дата звернення: Берез. 30, 2023.
- [5] Б. Галашин, "Вплив несиметрії напруги на роботу електрообладнання", на *VII Всеукр. студ. наук.-практ. конф. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання*, Тернопіль, 2017, с. 204.
- [6] П. Плешков, М. Полтовець, та І. Савеленко, *Оцінка економічних збитків при несиметрії напруги за нульовою послідовністю в сільських електричних мережах*. Кіровоград: КДТУ, 2002, с. 69-72.
- [7] В. Г. Ягуп, та К. В. Ягуп, *Моделювання та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання*: навч. посіб. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019.
- [8] А. А. Панов, и С. А. Тимчук, "Нечеткий алгоритм регулювання установившегося отклонения напряжения в электрической сети 0,4 кВ". Таллин: United Journal, № 26, с. 31-37, 2019.
- [9] А. А. Панов, и С. А. Тимчук, "Нечеткий алгоритм регулювання коэффициентов несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности", на *The 4<sup>th</sup> Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Osaka, Japan: CPN Publishing Group, 2019, pp. 670-679.
- [10] J. Feng, D. Zhao, G. Wu, Z. Liu, and J. Zhang, "Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems". [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/6287639/8274985/8031328-aam.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [11] Y. Zhou, P. Mancarella, and J. Mutale, "Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2267-2276, Feb. 2016.
- [12] А. О. Панов, "Регулювання коефіцієнтів несиметрії напруги нульової та зворотної

- послідовності в електричних мережах 0,4 кВ", на VII міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2020, Київ: КПІ, 2020, с. 16-17.
- [13] S. Tymchuk, S. Shendryk, V. Shendryk, A. Panov, A. Kazlauskaitė, and T. Levytska, "Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid", in *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*, A. Lopata, R. Butkienė, D. Gudonienė, and V. Sukackė, Eds, vol. 1283, Springer, Cham, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6).
- [14] А. О. Панов, "Розробка алгоритму регулювання усталеного відхилення напруги в розподільних мережах 0,4-10 кВ", на Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків: ХНАДУ, 2021, с. 170-174.
- [15] "Пристрій релейного захисту автоматики для регулювання під навантаженням трансформаторів РЗЛ-05.РПН". [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://releis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05rpn>. Дата звернення: Берез. 21, 2023.
- ### References
- [1] DSTU EN 50160:2014, "Characteristics of power supply voltage in general-purpose electrical networks". Instead of DSTU EN 20160:2010; Introduced 05/20/2014. Kyiv: Minekonomrozyvtku Ukrainy, 2014 [in Ukrainian].
- [2] P. Pleshkov, M. Poltovets, and I. Savelenko, *Estimation of economic losses during zero-sequence voltage measurement in rural electric networks*. Kirovohrad: KDTU, 2002, pp. 69-72 [in Ukrainian].
- [3] A. de Almeida, L. Moreira, and J. Delgado, *Power Quality Problems and New Solutions*. [Online]. Available: <http://www.icrepq.com/pdfs/PL4.ALMEDIA.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [4] O. G. Hryb, O. M. Dovgalyuk, and O. V. Sapryka, "Analysis of voltage deviation in electrical networks of internal lighting". [Online]. Available: [http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Daidzhest/2011/02\\_01\\_.pdf](http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Daidzhest/2011/02_01_.pdf). Accessed on: March 30, 2023 [in Ukrainian].
- [5] B. Galashin, "The influence of voltage asymmetry on the operation of electrical equipment", in *VII All-Ukr. Student Sci. and Pract. Conf. Natural and Humanitarian Sciences. Current issues*, Ternopil, 2017, p. 204 [in Ukrainian].
- [6] P. Pleshkov, M. Poltovets, and I. Savelenko, *Estimation of economic losses during zero-sequence voltage transmission in rural electric networks*. Kirovohrad: KDTU, 2002, pp. 69-72 [in Ukrainian].
- [7] V. G. Yagup, and K. V. Yagup, *Modeling and optimization of modes of energy supply and electricity consumption systems: manual*. Kharkiv: HNUMH named after O. M. Beketov, 2019 [in Ukrainian].
- [8] A. A. Panov, and S. A. Tymchuk, "Fuzzy algorithm for regulation of steady-state voltage deviation in the 0.4 kV electrical network". Tallinn: United Journal, no. 26, pp. 31-37, 2019 [in Russian].
- [9] A. A. Panov, and S. A. Tymchuk, "Fuzzy algorithm for regulation of reverse and zero-sequence voltage asymmetry coefficients, in *4th Int. Sci. and Pract. Conf. Perspectives of world science and education*, Osaka, Japan: CPN Publishing Group, 2019, pp. 670-679 [in Russian].
- [10] J. Feng, D. Zhao, G. Wu, Z. Liu, and J. Zhang, "Evaluating demand response impacts on capacity credit of renewable distributed generation in smart distribution systems". [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/ielam/6287639/8274985/8031328-aam.pdf>. Accessed on: March 30, 2023.
- [11] Y. Zhou, P. Mancarella, and J. Mutale, "Framework for capacity credit assessment of electrical energy storage and demand response", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 9, pp. 2267-2276, Feb. 2016.
- [12] A. O. Panov, "Regulation of zero- and reverse-sequence voltage asymmetry coefficients in 0.4 kV electrical networks", in *VII Int. Sci. and Pract. Conf. of young scientists, graduate students and students Automation and computer-integrated technologies – 2020*, Kyiv: KPI, 2020, pp. 16-17 [in Ukrainian].
- [13] S. Tymchuk, S. Shendryk, V. Shendryk, A. Panov, A. Kazlauskaitė, and T. Levytska,

- "Decision-Making Model at the Management of Hybrid Power Grid", in *Information and Software Technologies. ICIST 2020. Communications in Computer and Information Science*, A. Lopata, R. Butkienė, D. Gudonienė, and V. Sukackė, Eds, vol. 1283, Springer, Cham, 2020. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59506-7_6).
- [14] A. O. Panov, "Development of an algorithm for regulating the steady deviation of voltage in 0.4-10 kV distribution networks", in *All-Ukr. Sci. and Pract. Conf. of Higher Education Graduates and Young Scientists*, Kharkiv: KhNADU, 2021, pp. 170-174 [in Ukrainian].
- [15] "Automatic relay protection device for regulation under load of RZL-05.RPN transformers". [Online]. Available: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation/rzl-05/rzl-05rpn>. Accessed on: March 21, 2023 [in Ukrainian].

A. A. Panov, *Postgraduate*,  
e-mail: panovanton1994@gmail.com  
S. A. Tymchuk, *Dr. Tech. Sc., Professor*  
State Biotechnological University  
Alchevskykh St., 44, Kharkiv, 61002, Ukraine

### MODEL FOR REGULATING ELECTRICITY QUALITY INDICATORS IN 0.4-10 kV DISTRIBUTION NETWORKS

*Energy consumption is a prerequisite for the existence of mankind. The availability of energy available for consumption has always been necessary to meet human needs, increase the duration and improve the conditions of his/her life. The topic of electricity quality is the main one in Ukraine. Consumers of electrical energy work most efficiently at nominal voltage. However, it is practically impossible to provide nominal voltage to all consumers. Each conductor has a certain resistance, so the passage of electric current through the electrical network is associated with voltage losses. These losses do not remain constant, as the network load constantly changes throughout the day, season, and year. As a result of the load change, the voltage loss in the network also changes, and as a result, the voltage at the consumers' terminals changes. These changes can be quick and short-term (for example, when starting an induction motor with a short-circuited rotor) or slow and long-lasting (with a gradual change in load during a day or a year and with smooth voltage regulation). The paper presents the results of a study of the application of clear control algorithms for the task of normalizing voltage quality and asymmetry coefficients in electrical networks. On the basis of modeling, a new effective model of the algorithm for regulating the quality of electric energy in the distribution network is proposed. The prototype uses a new technical solution for regulating electricity quality indicators.*

*A model of regulation of the quality of electrical energy has been developed based on the method of fuzzy logic and the construction of a block diagram of the algorithm. A structural diagram of the "Relsis RZL-05.RPN" test system has been developed. The results of the research can be used in the design of a device for an on-load tap-changer connected to a transformer.*

**Keywords:** energy, voltage deviation, voltage asymmetry, fuzzy logic, automation, regulation under load.

[0000-0003-3642-2849] **S. V. Burmistrov**, *Ph.D. (Engineering)*,  
e-mail: sergij.burmistrov@ukr.net

[0000-0002-2093-1270] **V. I. Khotunov**, *Ph.D. (Pedagogy)*, Associate Professor,

[0000-0001-6314-5838] **M. V. Zakharova**, *Ph.D. (Engineering)*, Associate Professor,

[0000-0001-9864-3386] **S. L. Mykhaylyuta**, *Ph.D. (Engineering)*, Associate Professor,

[0000-0002-0248-0461] **M. V. Liuta**, *Head of the Software Engineering Department*  
Cherkasy State Business-College

Vyacheslav Chornovil st., 243, Cherkasy, 18028, Ukraine

## INDEX METHOD OF MINIMIZATION OF BOOLEAN FUNCTIONS

*The paper presents a new method of minimization that implements the Boolean function in classical minimal form of representation by means of a directed selection of possible ways of minimization according to the criteria of a necessary and sufficient condition – the index method. This method is a continuation of evolutionary development of methods of minimization by reducing the value of the basis coefficient  $K$ : the method of minimization by parts, the method of parallel decomposition by reducing  $K$ , the matrix method of parallel decomposition. The evolution of methods by reducing the value of the basis coefficient  $K$  is a thorough study of the structure and structural organization of a set of Boolean functions, a detailed analysis of the strengths and weaknesses of already existing previous variants of the methods, the identification of critical places that significantly slow down the minimization process, and the search for alternative ways of accelerating the minimization process. The index method is developed based on the use of a new way of recording individual Boolean functions in the form of indexes of significant rows of the truth table. Thanks to this form of recording, it has been possible both to realize the strengths of the previous methods and significantly improve the weak stages of the previous methods, which in general gives a big gain in the time of minimization. The advantage of the method is two-stage minimization of the process, which makes it possible not to use the directed sorting criterion directly. When forming a complete list of elements, the elements of the final answer are immediately obtained without specifying intermediate results. Structural elements of the method – a complete set of possible elements of the final answer for Boolean functions, containing one number of arguments for the value of the basic coefficient  $K=1\dots n$ , are formed even before the beginning of the execution of the method. and are used as a table value. When implementing the method, only units without zeros are processed in the columns of the truth table, which reduces the number of processing objects. The method is implemented by two-level column processing – checking necessary and sufficient conditions. The machine implementation of the method uses parallelization of the minimization process. All this significantly reduces the minimization time – the main value that distinguishes this method from others. The developed method of minimization is one of the constituent parts of the creation of the software code, which is the basis of the development of a fractal computer. The main feature of a fractal computer is the presence of fractal (non-smooth) functions in its software code, which will radically expand its capabilities in certain areas of computing. To date, none of modern computers uses these functions in the program code.*

**Keywords:** *method of minimization of Boolean functions, matrix method of parallel decomposition, resulting lines of Boolean function, parallelization of minimization process, basic coefficient  $K$ , fractal computer.*

**Introduction.** An urgent problem in the practical development of various types of digital systems remains the need to synthesize combinational circuits described by Boolean functions (**BF**) containing a large number of arguments.

A classical combinational circuit (**CS**) is a logic circuit, the values of output signals of which at an arbitrary point in time are completely

determined by the values of signals at its inputs [1, 2].

The optimal configuration of the **CS** is determined by a set of criteria for the complexity of **CS** implementation [3, 4]. They determine the complex characteristics of **CS**. Optimization of one of the set of criteria, as a rule, worsens the value of other criteria. There are two fundamental criteria that underlie the structure of **CS** and to

the meaning of which should be paid special attention. This is the operation time of **CS** ( $T_{CS}$ ) and the number of conditional transistors that make up **CS** ( $KUT_{CS}$ ).

$T_{CS}$  affects the performance of a digital device – the smaller the value of  $T_{CS}$ , the greater its performance is.

$KUT_{CS}$  affects the dimensions of digital device and energy intensity – electrical energy consumed by the device. The smaller the value of  $KUT_{CS}$ , the smaller the final circuit of the device is in terms of geometric dimensions, the less electrical energy it consumes.

Historically, **CS** synthesis methods are usually divided into two large classes [1]: two-level and multi-level ones. With two-level synthesis, the signal passes from the input to the output of combinational circuit through two levels of logic elements. With multi-level synthesis, a complex structure is created, the nodes of which are analogues of two-level schemes.

One of the main stages of the synthesis of combination schemes, which affects the value of  $T_{CS}$  and  $KUT_{CS}$  coefficients, is the stage of **BF** minimization, which logically describes the operation of **CS**. The consequence of solving **BF** minimization problem [2, 3] is the synthesis of two-level or multi-level **CS**.

The result of **BF** minimization is the implementation of a two-level **CS** in one of the implementation options (Figure 1) [5].

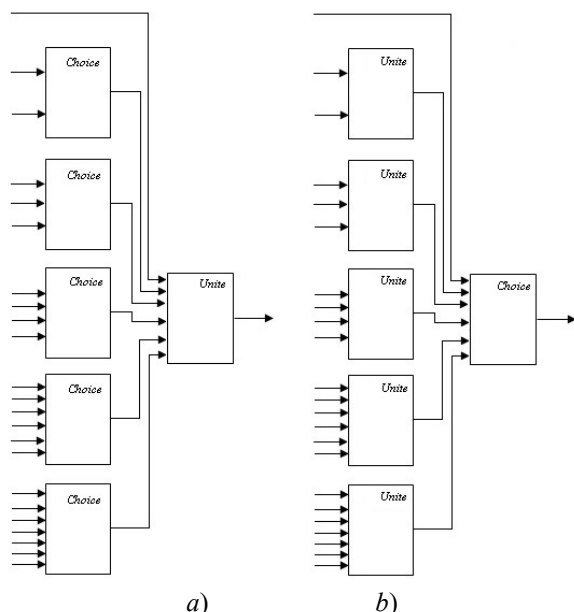


Figure 1. Options for implementing a two-level **CS**:

- a) with a unitive (*Unite\_LE*) logic element;
- b) with a choice (*Choice\_LE*) logic element

In **CS**, the selection logic element (*Choice\_LE*) can be one of the types of logic elements, which, according to its logic function, selects one of the possible variants of combinations of input signals.

The uniting logic element (*Unite\_LE*) in **CS** can be one of the types of logic elements, which by its logic function selects several possible variants of combinations of input signals.

The result of **BF** minimization in case *a*) is the **BF** in classical form of representation (*CFP*) or polynomial form of Reed-Müller representation (*RMFP*). **CS**s built on the basis of **BF** specified in *KFP* or *RMFP* have the best values of  $T_{CS}$  criterion and differ in maximum speed.

A successful result of **BF** minimization, which leads to the creation of a multi-level **CS** (Figure 2), is the orthogonal form of **BF** representation (*ORFP*) [3]. Multi-level **CS**, as a rule, have better indicators of  $KUT_{CS}$  criterion [6, 7].

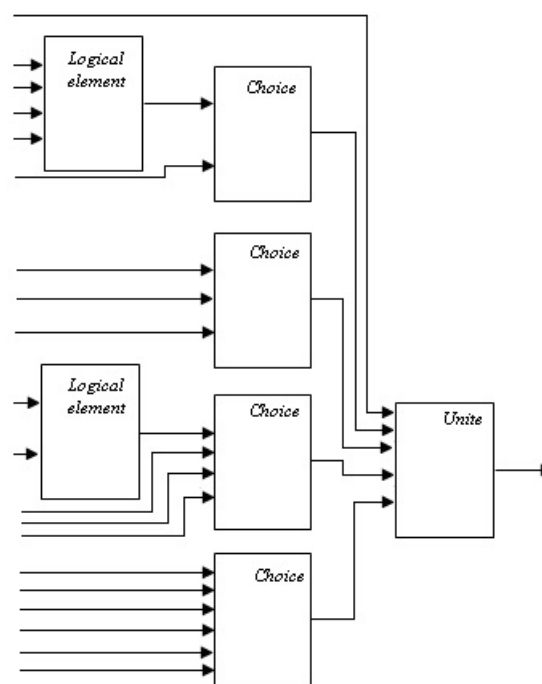


Figure 2. Implementation of a multi-level **CS**

As a result, when choosing the construction of either two-level or multi-level **CS**, a contradiction arises when constructing a **CS** – either to build a scheme with greater work productivity, or to build an energy-saving scheme with minimal geometric dimensions [8, 9].

An actual problem in the development of **BF** minimization methods containing a large number of arguments is the construction of methods that lead to a complete answer in less time.

The purpose of the research is to find a **BF** minimization method with a large number of arguments, given in classical form of representation, which is practically implemented in the minimum possible time.

**CFP** is the most implemented form of representation in computer electronics. The advantage of the minimal form of **BF** in **CFP** compared to other forms of representation of **BF** is that **CS** has the best indicators of the value of **T<sub>CS</sub>** criterion. At the same time, the value of **KUT<sub>CS</sub>** criterion is much better than in other forms of **BF** representation.

There is a large number of methods for obtaining the minimal form of **BF** in **CFP**, a simple list of which is far from a trivial task [13, 14, 15]. All these methods, as a rule, provide a complete solution to the problem. However, all of them have one significant drawback – the speed of obtaining a complete result, the minimal form of **BF** in **CFP**, in them falls in an avalanche even with a slight increase in the number of arguments containing **BF**, even when using powerful hardware and software tools designed for obtaining the final answer.

In order to understand the search for the direction of the optimal minimization method, the following questions and answers to the questions that will arise during their investigation should be considered:

- what is **BF**, what is its structure from the point of view of its minimization;
- the problem of arranging and classifying **BF**, determining the criteria for combining **BF** into a single set;
- interdependence and subordination between **BF** containing the same and different number of arguments;
- arrangement of studies of the properties of **BF** sets according to their key properties;
- implementation of **BF** properties and properties of **BF** sets to build an optimal minimization method according to the given criteria of the complexity of **CS** implementation.

The implementation of the set tasks is based on a detailed analysis of already implemented methods, identification of problematic stages of implementation and methods of accelerating these stages.

**BF** is a type of logical function defined by a truth table (**TI BF**) (Table 1). Therefore, the main object of research in the article is **TI BF** as the main element on the basis of which the **BF** minimization method is built.

Table 1. Definition of a Boolean function using a truth table

| Line number | $x_{n-1}$ | ... | $x_1$ | $x_0$ | $F$       |
|-------------|-----------|-----|-------|-------|-----------|
| 0           | 0         | ... | 0     | 0     | $f_0$     |
| 1           | 0         | ... | 0     | 1     | $f_1$     |
| ...         | ...       | ... | ...   | ...   | ...       |
| $2^{n-2}$   | 1         | ... | 1     | 0     | $f_{m-2}$ |
| $2^{n-1}$   | 1         | ... | 1     | 1     | $f_{m-1}$ |

To order the elements of the set **BF**, it is customary to consider the column of the result **F** in **TI BF** as the number of the Boolean function  $F = \{f_m, f_{m-2}, \dots, f_1, f_0\}$  (see Table 1), where the digits  $f_i$  can take the value 0 or 1. Depending on the number of arguments  $n$  of the Boolean function, **BF** number consists of  $2^n$  digits. Accordingly, the set BF containing the same number of arguments contains  $2^{2^n}$  BF (Table 2).

Table 2. An avalanche of the number of Boolean functions when the number of their arguments increases

| No in order | Quantity arguments | The quantity of digits in Boolean function number | The quantity of Boolean functions containing the same number of arguments |
|-------------|--------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1           | 1                  | 2                                                 | 4                                                                         |
| 2           | 2                  | 4                                                 | 16                                                                        |
| 3           | 3                  | 8                                                 | 256                                                                       |
| 4           | 4                  | 16                                                | 65 536                                                                    |
| 5           | 5                  | 32                                                | 4 294 967 296                                                             |

A fundamental property of **BF**, which combines Boolean functions containing a different number of arguments, is the Shannon decomposition. Using the Shannon decomposition, an arbitrary **BF** containing  $n$  arguments can be represented by a **BF** containing  $n-1$  arguments in  $n$  ways [10].

In general case of the **CFP**, the Shannon decomposition has the form:

$$y = f(x_{n-1}, \dots, x_i, \dots, x_0) = x_i \cdot \Phi_1(x_{n-1}, \dots, x_{i+1}, x_{i-1}, \dots, x_0) \vee \overline{x_i} \cdot \Phi_0(x_{n-1}, \dots, x_{i+1}, x_{i-1}, \dots, x_0).$$

An arbitrary **BF** with  $n$  arguments is written in the form of a logical disjunctive series containing two terms, each of which contains a **BF** with  $n-1$  arguments [10].

If the decomposition is performed several times, it will lead to the formation of a logical disjunctive series (1), where each member of the series consists of two parts, which, by analogy with geometry, is called the basic part  $Q_i$ , containing  $k$  arguments ( $0 \leq k \leq n-1$ ) and informational part  $\Phi_i$ . Information part  $\Phi_i$  is a **BF** containing  $n-k$  arguments.

$$y = f(x_{n-1}, \dots, x_i, \dots, x_0) = \bigvee_{i=1}^{2^k-1} Q_i \wedge \Phi_i \quad (1)$$

In order to show the degree of decomposition of the members of **BF** series, let's enter the value of the base coefficient  $K$  – the degree of decomposition of the member of logical disjunctive series **BF**. It indicates the number of arguments contained in the base part in this member.

It is this property that unites **BF** into a complete set of Boolean functions and is decisive when studying the properties of **BF**.

If we consider the interdependence between Boolean functions in the complete set **BF** through the Shannon decomposition, it can be shown that **BF** has a pronounced fractal structure.

An arbitrary Boolean function containing  $n$  arguments is the result of the mutual composition of  $n$  pairs containing  $n-1$  arguments.

In other words, an arbitrary **BF** stores information about all parent functions starting from the primary parent **BFs** containing 1 argument – "logical 0" (00), "logical 1" (11) and **BF** non-constants (01, 10).

As a result of the decomposition of an arbitrary **BF** in informational part of  $\Phi_i$ , the mother **BFs** that are in the genetic code of the specified **BF** are obtained. It is maternal **BF** that affects the degree of **BF** minimization. If, at a certain stage of the decomposition, the parent **BF**, the informational part of  $\Phi_i$ , is a "logical 0", then the value of the specified member of logical disjunctive series is zero. If, at a certain stage of the decomposition, the parent **BF** is a "logical 1", then the value of the indicated member of logical disjunctive series is equal to the value of the basic part  $Q_i$ .

Only those Boolean functions that contain the parent **BF** "logical 0" or "logical 1" in their genetic code are minimized in **CFP**.

**Presenting main material.** For a long time, minimization methods built on the basis of **BF** decomposition in **CFP** were irrelevant, since they did not compete with classical **BF** minimization methods. For Boolean functions containing a large number of arguments, the situation is radically different – the time to obtain the minimization result by classical method increases exponentially.

The fractal character of **BF** structure indicates that the solution of a typical problem of processing fractal structures, including **BF** minimization, is solved by a directed search with the application of certain path selection criteria using **BF** decomposition. Solving this problem is a search for the shortest way to perform the decomposition of the members of a disjunctive logical series until informational parts  $Q_i$  in all members of the series are equal to either the value "logical 0" or "logical 1".

As practical experience shows, solving this problem by directly performing the decomposition in the shortest way, the problem is generally unsolvable. The reason is that there is no clear criterion for finding the shortest decomposition path.

Another way of using the **BF** decomposition to create an efficient minimization method can be suggested. When decomposing **BF**, three groups of logical terms can be formed:

- logical terms in which informational part  $\Phi_i$  is not equal to "logical 1" and not equal to "logical 0";
- logical terms in which informational part of  $\Phi$  is equal to "logical 0";
- logical terms in which informational part of  $\Phi_i$  is equal to "logical 1".

Only the third group of logical terms is of practical interest, and not all, but only those in which the value of the coefficient  $K$  is the maximum possible.

Due to the lack of a clear criterion for the optimal direction of the decomposition, it is advisable to implement the minimization method by replacing the direct decomposition of **BF** with the solution of the two-stage problem. At the first stage, all terms of logical series of the third group are searched for the values of the basic coefficient  $K=1, 2, \dots, n-1$  (namely, the list of the corresponding basic parts of  $Q_i$ ).

At the second stage, a final minimized logic series is constructed from the specified  $Q_i$  according to the full coverage criterion.

As a result, either 1 or several solutions are obtained by the decomposition method – the minimal forms of the specified  $BF$  in  $CFP$ .

The development of optimal minimization decomposition methods is implemented in two directions:

1. Search for terms of the third group of logical series by increasing the value of the basic coefficient  $K$ .

2. Search for terms of the logical series of the third group by reducing the value of the basic coefficient  $K$ .

Each direction has its strengths and weaknesses. The authors of the article consider the direction of searching for terms of logical series of the third group to be more promising by reducing the value of the basic coefficient  $K$  from the point of view of the time of obtaining the final result. On the long way to obtaining a result, the authors have proposed several minimization methods that realize the possibilities of this direction (in chronological order of creation), namely:

1. The method of minimization by parts [10, 11, 12].

2. Parallel decomposition by reducing the value of the base coefficient  $K$  [13, 14].

3. Matrix method of parallel decomposition [15].

Each of the subsequent obtained methods is an evolutionary development of the previous ones. They were developed through a detailed analysis of the strengths and weaknesses of previous methods, identification of critical points that significantly slow down the minimization process, and search for alternative ways to speed up the minimization process.

The index method of minimization of Boolean functions is an evolutionary continuation of the previous methods. It is developed based on the analysis of the matrix method (Figure 3), takes into account the concept and the strengths of the previous methods and significantly accelerates the minimization process.

The directed sorting of the elements of the ready answer, which is the basis of this method, involves the use of sorting criteria that indicate the direction of the shortest movement to the result during sorting. A detailed analysis of selection criteria makes it possible to divide them into two groups:

- criteria of the necessary condition of the search;

- criteria of a sufficient condition of the search.

The criteria of a sufficient condition of search are decisive. The minimization method can be built only on the criteria of a sufficient condition of search. They accurately indicate whether the basis part  $Q_i$  of disjunctive logic series is an element of the final answer with the maximum value of the basis coefficient  $K$ . The implementation of the minimization method in  $CFP$  makes it possible to obtain a guaranteed full final answer. The disadvantage of this approach is that the verification of criteria for the sufficient condition of sorting is quite lengthy in time, which in turn slows down the entire minimization process.

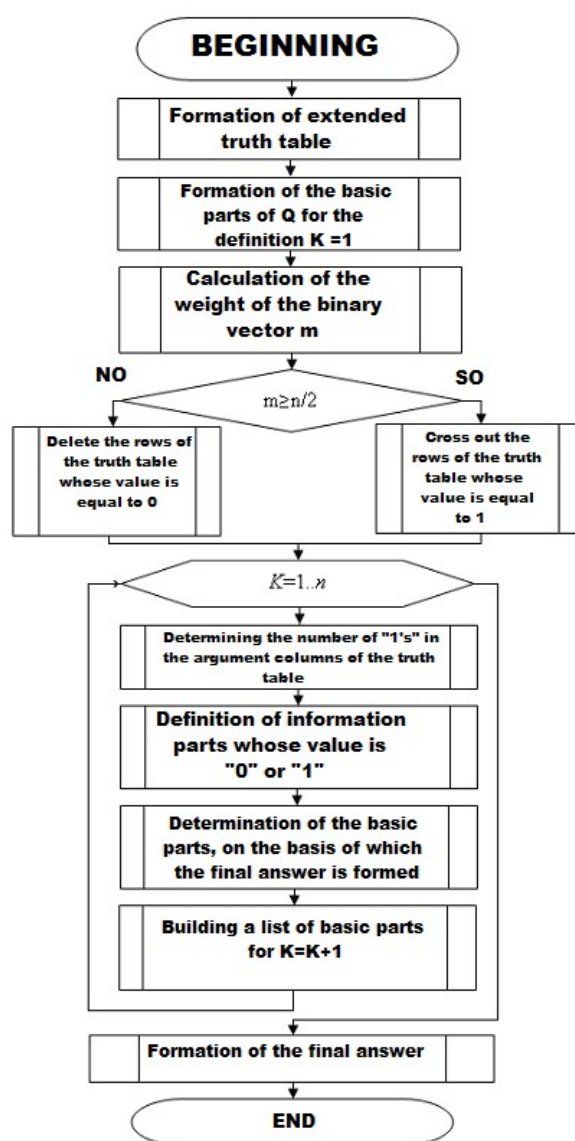


Figure 3. Algorithm for implementation of the matrix method of parallel decomposition

The necessary search condition criteria are not determinative when searching for elements of the final answer, but they specify exactly which basis part of  $Q_i$  is not an element of the final answer. As a rule, these criteria are not obvious when used for Boolean functions with a small number of arguments. Their role and number grow precisely with the growth of arguments in **BF**. The advantage of using the necessary condition criterion is that the check is several orders of magnitude faster than the sufficient condition check.

It is the search and application of the criteria for non-necessary condition of directed search that makes it possible to significantly speed up the minimization method.

The index method of minimization of Boolean functions is developed on the basis of and taking into account the features of the matrix method of parallel decomposition [15].

When analyzing the implementation of the matrix method (see Figure 3), it has been found that the slowest stage in the execution time of the specified method is the stage "Determination of the number of units in the columns of TI arguments". As a rule, it is necessary to sort  $2^{n-1}$  digits to calculate the sum of the criterion of the sufficient sorting condition. As the number of arguments  $n$  increases, this number grows exponentially. What is important, as a rule, when counting, most of numbers are zeros, numbers that do not affect the result, but significantly reduce the counting time.

The index minimization method is designed to exclude these zeros from the counting process and, accordingly, to speed up the search for elements that meet the criterion.

It is advisable to explain the essence of the method using an example, describing in detail the **BF** minimization algorithm. Let **BF** be given, having the number 1 467 447 187<sub>10</sub>. The binary digital code **BF** consists of 5 arguments ( $n=5$ ) and is

0101 0111 0111 0111 0111 0111 0101<sub>2</sub>.

Stage 1. Formation of a complete list of elements of the final answer.

1. Write all lines of **TI BF**  $f_{1467447157}^{(5)}$  (Table 3), the value of which in the column of the result is equal to 1. These are the resulting lines of **TI BF** for the value of the basic coefficient  $K=1$ .

Write lines in the table of result lines in the form of sets of 0 and 1 line arguments – digital

binary codes of TI BF lines {00000, 00100, 00100, 00101, 00110, 01000, 01001, 01010, 01100, 01101, 01110, 100001, 10000 10010, 10100, 10101, 10110, 11000, 11001, 11010, 11100, 11110} and the corresponding row indices {00,02,04,05, 06,08,09,10, 12,13,14,16, 17,18,20,21, 22,24,25,26, 28,30}. As a result, the index digital code of the Boolean function is 30282625242221201817161413121009080605040200

Table 3. Truth table of the Boolean function  $f_{1467447157}^{(5)}$

| Strings of arguments |       |       |       |       | y | The resulting string (K=1) | Row index |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|---|----------------------------|-----------|
| $x_5$                | $x_4$ | $x_3$ | $x_2$ | $x_1$ |   |                            |           |
| 0                    | 0     | 0     | 0     | 0     | 1 | 00000                      | 00        |
| 0                    | 0     | 0     | 0     | 1     | 0 |                            |           |
| 0                    | 0     | 0     | 1     | 0     | 1 | 00010                      | 02        |
| 0                    | 0     | 0     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 0                    | 0     | 1     | 0     | 0     | 1 | 00100                      | 04        |
| 0                    | 0     | 1     | 0     | 1     | 1 | 00101                      | 05        |
| 0                    | 0     | 1     | 1     | 0     | 1 | 00110                      | 06        |
| 0                    | 0     | 1     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 0                    | 1     | 0     | 0     | 0     | 1 | 01000                      | 08        |
| 0                    | 1     | 0     | 0     | 1     | 1 | 01001                      | 09        |
| 0                    | 1     | 0     | 1     | 0     | 1 | 01010                      | 10        |
| 0                    | 1     | 0     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 0                    | 1     | 1     | 0     | 0     | 1 | 01100                      | 12        |
| 0                    | 1     | 1     | 0     | 1     | 1 | 01101                      | 13        |
| 0                    | 1     | 1     | 1     | 0     | 1 | 01110                      | 14        |
| 0                    | 1     | 1     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 1                    | 0     | 0     | 0     | 0     | 1 | 10000                      | 16        |
| 1                    | 0     | 0     | 0     | 1     | 1 | 10001                      | 17        |
| 1                    | 0     | 0     | 1     | 0     | 1 | 10010                      | 18        |
| 1                    | 0     | 0     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 1                    | 0     | 1     | 0     | 0     | 1 | 10100                      | 20        |
| 1                    | 0     | 1     | 0     | 1     | 1 | 10101                      | 21        |
| 1                    | 0     | 1     | 1     | 0     | 1 | 10110                      | 22        |
| 1                    | 0     | 1     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 1                    | 1     | 0     | 0     | 0     | 1 | 11000                      | 24        |
| 1                    | 1     | 0     | 0     | 1     | 1 | 11001                      | 25        |
| 1                    | 1     | 0     | 1     | 0     | 1 | 11010                      | 26        |
| 1                    | 1     | 0     | 1     | 1     | 0 |                            |           |
| 1                    | 1     | 1     | 0     | 0     | 1 | 11100                      | 28        |
| 1                    | 1     | 1     | 0     | 1     | 0 |                            |           |
| 1                    | 1     | 1     | 1     | 0     | 1 | 11110                      | 30        |
| 1                    | 1     | 1     | 1     | 1     | 0 |                            |           |

2. Form **TI** arguments of **BF**  $f(5)$ . For the convenience and compactness of the image on paper, turn **TI** by  $90^0$  (Table 4, *a, b, c*) so that the columns of **TI** become rows. The index digital code of argument lines is obtained by writing out the indices of the units of the binary code. The list of arguments of the truth table of the Boolean function can be written in different forms:

1) In the form of the row number of the argument of the truth table of the Boolean function (see Table 4, *a*).

Table 4, *a*. A list of truth table arguments of a Boolean function in the form of an argument line number

| № in order | № of arguments | Argument line number                    |
|------------|----------------|-----------------------------------------|
| 1          | $x_1$          | 1010 1010 1010 1010 1010 1010 1010 1010 |
| 2          | $x_2$          | 1100 1100 1100 1100 1100 1100 1100 1100 |
| 3          | $x_3$          | 1111 0000 1111 0000 1111 0000 1111 0000 |
| 4          | $x_4$          | 1111 1111 0000 0000 1111 1111 0000 0000 |
| 5          | $x_5$          | 1111 1111 1111 1111 0000 0000 0000 0000 |

2) In the form of an index number code of argument lines (see Table 4, *b*).

Table 4, *b*. A list of truth table arguments of a Boolean function in the form of an index numeric code of argument strings

| № in order | № of arguments | Index numeric code of argument strings |
|------------|----------------|----------------------------------------|
| 1          | $x_1$          | 31292725232119171513110907050301       |
| 2          | $x_2$          | 31302726232219181514111007060302       |
| 3          | $x_3$          | 31302928232221201514131207060504       |
| 4          | $x_4$          | 31302928272625241514131211100908       |
| 5          | $x_5$          | 31302928272625242322212019181716       |

The index code of argument lines is obtained by writing out the indices of **TI** argument column units from bottom to top.

3) In the form of a digital binary code of argument lines (see Table 4, *c*).

Table 4, *c*. A list of truth table arguments of a Boolean function in the form of a digital binary code

| № in order | № of arguments | Digital binary code |
|------------|----------------|---------------------|
| 1          | $x_1$          | ****1               |
| 2          | $x_2$          | ***1*               |
| 3          | $x_3$          | **1**               |
| 4          | $x_4$          | *1***               |
| 5          | $x_5$          | 1****               |

3. On the basis of the truth table of arguments of the Boolean function, which contains 5 arguments, build a table of possible elements of the final answer – the basic parts  $Q_i$  of the terms of disjunctive logical series, in which the information part  $\Phi_i$  is equal to "logical 1" for the value base coefficient  $K=1$ , by adding additional rows with inverse arguments to the truth table of arguments of the Boolean function (Table 5).

Table 5. The table of possible elements of the final answer of the truth table of the Boolean function at  $K=1$

| № in order | Kind of literal  | A complete list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at $K=1$ |                     |
|------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|            |                  | Index digital code                                                                              | Binary digital code |
| 0          | $x_1$            | 31292725232119171513110907050301                                                                | ****1               |
| 1          | $\overline{x_1}$ | 30282624222018161412100806040200                                                                | ****0               |
| 2          | $x_2$            | 31302726232219181514111007060302                                                                | ***1*               |
| 3          | $\overline{x_2}$ | 29282524212017161312090805040100                                                                | ***0*               |
| 4          | $x_3$            | 31302928232221201514131207060504                                                                | **1**               |
| 5          | $\overline{x_3}$ | 27262524191817161110090803020100                                                                | **0**               |
| 6          | $x_4$            | 31302928272625241514131211100908                                                                | *1***               |
| 7          | $\overline{x_4}$ | 23222120191817160706050403020100                                                                | *0***               |
| 8          | $x_5$            | 31302928272625242322212019181716                                                                | 1****               |
| 9          | $\overline{x_5}$ | 15141312111009080706050403020100                                                                | 0****               |

4. Check the necessary condition: whether the elements of the full list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=1$  (see Table 5) belong to the set of elements of the resulting lines (see Table 3).

When checking, the sign "\*" replaces numbers "0" and "1". If the condition is not fulfilled, the possible element of the final truth answer does not belong to the set. It must be crossed out (Table 6).

In this case, the necessary condition is fulfilled for all possible elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=1$ .

5. Check the sufficient condition: whether possible elements are really the elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=1$ . Sufficient condition criterion: all index values of the index code of a possible element of the final answer must have the index code of the Boolean function (see Table 5).

**Table 6. Checking of the necessary condition of belonging to possible elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=1$**

| Possible elements of the final answer at $K=1$ |       | The matching element of the result string ( $K=1$ ) | Result |
|------------------------------------------------|-------|-----------------------------------------------------|--------|
| $x_1$                                          | ****1 | 00101                                               | +      |
| $\overline{x_1}$                               | ****0 | 00000                                               | +      |
| $x_2$                                          | ***1* | 00110                                               | +      |
| $\overline{x_2}$                               | ***0* | 00000                                               | +      |
| $x_3$                                          | **1** | 00100                                               | +      |
| $\overline{x_3}$                               | **0** | 00000                                               | +      |
| $x_4$                                          | *1*** | 01000                                               | +      |
| $\overline{x_4}$                               | *0*** | 00000                                               | +      |
| $x_5$                                          | 1**** | 10000                                               | +      |
| $\overline{x_5}$                               | 0**** | 00000                                               | +      |

*Result:* with  $K=1$ , one element of the final answer is obtained:  $\overline{x_1}$ .

6. Analogous actions: formation and editing of the next full list of possible elements of the final answer, checking the necessary and sufficient conditions, must be performed at  $K=2\dots5$ .

7. Form the list of indices of the result lines with  $K=2$ . For this, it is necessary to cross out the list of elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=1$  from the list of resulting lines at  $K=1$  (Table 7). In this case, the lines described by the mask (\*\*\*\*0) should be crossed out from the table. As a result, 16 lines are crossed out. The result of the check is in Table 6: indices of the resulting rows at  $K=2$  constitute (05, 09, 13, 17, 21, 25).

**Table 7. List of result lines at  $K=2$**

| № in order | The index of the resulting row | Result line ( $K=1$ ) | Result |
|------------|--------------------------------|-----------------------|--------|
| 1          | 00                             | 00000                 | -      |
| 2          | 02                             | 00010                 | -      |
| 3          | 04                             | 00100                 | -      |
| 4          | 05                             | 00101                 | +      |
| 5          | 06                             | 00110                 | -      |
| 6          | 08                             | 01000                 | -      |
| 7          | 09                             | 01001                 | +      |
| 8          | 10                             | 01010                 | -      |
| 9          | 12                             | 01100                 | -      |
| 10         | 13                             | 01101                 | +      |
| 11         | 14                             | 01110                 | -      |
| 12         | 16                             | 10000                 | -      |
| 13         | 17                             | 10001                 | +      |
| 14         | 18                             | 10010                 | -      |
| 15         | 20                             | 10100                 | -      |
| 16         | 21                             | 10101                 | +      |
| 17         | 22                             | 10110                 | -      |
| 18         | 24                             | 11000                 | -      |
| 19         | 25                             | 11001                 | +      |
| 20         | 26                             | 11010                 | -      |
| 21         | 28                             | 11100                 | -      |
| 22         | 30                             | 11110                 | -      |

8. Check the necessary condition: whether the elements of the full list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=2$  belong to the set of elements of the resulting lines. When checking, the sign "\*" replaces numbers "0" and "1". If the condition is not fulfilled, the possible element of the final truth answer does not belong to the set. It should be crossed out (Table 8).

Table 8. The table of verification of the necessary condition of possible elements of the final answer of the truth table of the Boolean function at  $K=2$

| № in order | Conjunctive set of arguments ( $K=2$ ) | A complete list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at $K=2$ |                     | Result |
|------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|--------|
|            |                                        | Index digital code                                                                              | Binary digital code |        |
| 1          | $x_2x_1$                               | 2824201612080400                                                                                | ***00               | -      |
| 2          | $x_2x_1$                               | 3026221814100602                                                                                | ***10               | -      |
| 3          | $x_3x_1$                               | 2624181610080200                                                                                | **0*0               | -      |
| 4          | $x_3x_1$                               | 3028222014120604                                                                                | **1*0               | -      |
| 5          | $x_4x_1$                               | 2220181606040200                                                                                | *0**0               | -      |
| 6          | $x_4x_1$                               | 3028262414121008                                                                                | *1**0               | -      |
| 7          | $x_5x_1$                               | 1412100806040200                                                                                | 0***0               | -      |
| 8          | $x_5x_1$                               | 3028262422201816                                                                                | 1***0               | -      |
| 9          | $x_2x_1$                               | 2925211713090501                                                                                | ***01               | +      |
| 10         | $x_2x_1$                               | 3127231915110703                                                                                | ***11               | -      |
| 11         | $x_3x_1$                               | 2725191711090301                                                                                | **0*1               | +      |
| 12         | $x_3x_1$                               | 3129232115130705                                                                                | **1*1               | +      |
| 13         | $x_4x_1$                               | 2321191707050301                                                                                | *0**1               | +      |
| 14         | $x_4x_1$                               | 3129272515131109                                                                                | *1**1               | +      |
| 15         | $x_5x_1$                               | 1513110907050301                                                                                | 0***1               | +      |
| 16         | $x_5x_1$                               | 3129272523211917                                                                                | 1***1               | +      |
| 17         | $x_3x_2$                               | 2524171609080100                                                                                | **00*               | +      |
| 18         | $x_3x_2$                               | 2928212013120504                                                                                | **10*               | +      |
| 19         | $x_4x_2$                               | 2120171605040100                                                                                | *0*0*               | +      |
| 20         | $x_4x_2$                               | 2928252413120908                                                                                | *1*0*               | +      |
| 21         | $x_5x_2$                               | 1312090805040100                                                                                | 0**0*               | +      |
| 22         | $x_5x_2$                               | 2928252421201716                                                                                | 1**0*               | +      |
| 23         | $x_3x_2$                               | 2726191811100302                                                                                | **01*               | -      |
| 24         | $x_3x_2$                               | 3130232215140706                                                                                | **11*               | -      |
| 25         | $x_4x_2$                               | 2322191807060302                                                                                | *0*1*               | -      |
| 26         | $x_4x_2$                               | 3130272615141110                                                                                | *1*1*               | -      |
| 27         | $x_5x_2$                               | 1514111007060302                                                                                | 0**1*               | -      |
| 28         | $x_5x_2$                               | 3130272623221918                                                                                | 1**1*               | -      |
| 29         | $x_4x_3$                               | 1918171603020100                                                                                | *00**               | -      |
| 30         | $x_4x_3$                               | 2726252411100908                                                                                | *10**               | +      |
| 31         | $x_5x_3$                               | 1110090803020100                                                                                | 0*0**               | +      |
| 32         | $x_5x_3$                               | 2726252419181716                                                                                | 1*0**               | +      |
| 33         | $x_4x_3$                               | 2322212007060504                                                                                | *01**               | +      |
| 34         | $x_4x_3$                               | 3130292815141312                                                                                | *11**               | +      |
| 35         | $x_5x_3$                               | 1514131207060504                                                                                | 0*1**               | +      |
| 36         | $x_5x_3$                               | 3130292823222120                                                                                | 1*1**               | +      |
| 37         | $x_5x_4$                               | 0706050403020100                                                                                | 00***               | +      |
| 38         | $x_5x_4$                               | 2322212019181716                                                                                | 10***               | +      |
| 39         | $x_5x_4$                               | 1514131211100908                                                                                | 01***               | +      |
| 40         | $x_5x_4$                               | 3130292827262524                                                                                | 11***               | +      |

9. Check the sufficient condition: whether possible elements for which the necessary condition is fulfilled are really the elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=2$ . Sufficient condition criterion: all index values of the index code of a possible element of the final answer must have the index code of the Boolean function (see Table 7).

*Result:* at  $K=2$ , no possible element is an element of the final answer.

10. Form the list of result lines with  $K=3$ . Since at  $K=2$  there are no elements of the final truth answer of the Boolean function, the list of resulting lines remains unchanged (Table 9).

Table 9. List of resulting lines with  $K=3$

| № in order | The index of the resulting row | The resulting string ( $K=3$ ) |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1          | 05                             | 00101                          |
| 2          | 09                             | 01001                          |
| 3          | 13                             | 01101                          |
| 4          | 17                             | 10001                          |
| 5          | 21                             | 10101                          |
| 6          | 25                             | 11001                          |

11. Check the necessary condition: whether the elements of the full list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at  $K=3$  belong to the set of elements of the resulting lines (Table 10). For the sake of compactness of the record, the table lists only possible elements for which the necessary condition is fulfilled (out of 80 lines, 36 lines are shown).

12. Check the sufficient condition: whether possible elements for which the necessary condition is fulfilled are really the elements of the final truth answer of the Boolean function for  $K=3$  (see Table 10).

13. Formation of the list of result lines with  $K=4$ . As a result of crossing out the final elements in the table of result lines, an empty table has been obtained. Therefore, there is no need to check the necessary and sufficient condition for  $K=4$  and  $K=5$ .

Table 10. Table of verification of the necessary condition of possible elements of the final answer of the truth table of the Boolean function at  $K=3$

| № in order | Conjunctive set of arguments ( $K=3$ ) | A complete list of possible elements of the final truth answer of the Boolean function at $K=3$ |                     |
|------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
|            |                                        | Index digital code                                                                              | Binary digital code |
| 1          | $\bar{x}_3\bar{x}_2x_1$                | 25170901                                                                                        | **001               |
| 2          | $x_3\bar{x}_2x_1$                      | 29211305                                                                                        | **101               |
| 3          | $\bar{x}_4\bar{x}_2x_1$                | 21170501                                                                                        | *0*01               |
| 4          | $x_4\bar{x}_2x_1$                      | 29251309                                                                                        | *1*01               |
| 5          | $\bar{x}_4\bar{x}_3x_1$                | 19170301                                                                                        | *00*1               |
| 6          | $\bar{x}_4x_3x_1$                      | 23210705                                                                                        | *01*1               |
| 7          | $x_4\bar{x}_3x_1$                      | 27251109                                                                                        | *10*1               |
| 8          | $x_4x_3x_1$                            | 31291513                                                                                        | *11*1               |
| 9          | $\bar{x}_4x_3\bar{x}_2$                | 21200504                                                                                        | *010*               |
| 10         | $x_4\bar{x}_3\bar{x}_2$                | 25240908                                                                                        | *100*               |
| 11         | $x_4x_3\bar{x}_2$                      | 29281312                                                                                        | *110*               |
| 12         | $\bar{x}_5\bar{x}_2x_1$                | 13090501                                                                                        | 0**01               |
| 13         | $x_5\bar{x}_2x_1$                      | 29252117                                                                                        | 1**01               |
| 14         | $\bar{x}_5x_3x_1$                      | 11090301                                                                                        | 0*0*1               |
| 15         | $\bar{x}_5x_3x_1$                      | 15130705                                                                                        | 0*1*1               |
| 16         | $x_5x_3x_1$                            | 26241816                                                                                        | 1*0*0               |
| 17         | $x_5x_3x_1$                            | 27251917                                                                                        | 1*0*1               |
| 18         | $x_5x_3x_1$                            | 31292321                                                                                        | 1*1*1               |
| 19         | $\bar{x}_5\bar{x}_3\bar{x}_2$          | 09080100                                                                                        | 0*00*               |
| 20         | $\bar{x}_5x_3\bar{x}_2$                | 13120504                                                                                        | 0*10*               |
| 21         | $x_5\bar{x}_3\bar{x}_2$                | 25241716                                                                                        | 1*00*               |
| 22         | $x_5x_3\bar{x}_2$                      | 29282120                                                                                        | 1*10*               |
| 23         | $\bar{x}_5\bar{x}_4x_1$                | 07050301                                                                                        | 00**1               |
| 24         | $\bar{x}_5x_4x_1$                      | 15131109                                                                                        | 01**1               |
| 25         | $x_5\bar{x}_4x_1$                      | 23211917                                                                                        | 10**1               |
| 26         | $x_5x_4x_1$                            | 31292725                                                                                        | 11**1               |
| 27         | $\bar{x}_5\bar{x}_4\bar{x}_2$          | 05040100                                                                                        | 00*0*               |
| 28         | $\bar{x}_5x_4\bar{x}_2$                | 13120908                                                                                        | 01*0*               |
| 29         | $x_5\bar{x}_4\bar{x}_2$                | 21201716                                                                                        | 10*0*               |
| 30         | $x_5x_4\bar{x}_2$                      | 29282524                                                                                        | 11*0*               |
| 31         | $\bar{x}_5\bar{x}_4x_3$                | 07060504                                                                                        | 001**               |
| 32         | $\bar{x}_5x_4x_3$                      | 11100908                                                                                        | 010**               |
| 33         | $\bar{x}_5x_4x_3$                      | 15141312                                                                                        | 011**               |
| 34         | $x_5\bar{x}_4x_3$                      | 19181716                                                                                        | 100**               |
| 35         | $x_5x_4x_3$                            | 23221918                                                                                        | 101**               |
| 36         | $x_5x_4x_3$                            | 27262524                                                                                        | 110**               |

Result: with  $K=3$ , 6 elements are elements of the final answer:  $\bar{x}_4x_3\bar{x}_2$ ,  $x_4\bar{x}_3\bar{x}_2$ ,  $\bar{x}_5x_3\bar{x}_2$ ,  $x_5\bar{x}_3\bar{x}_2$ ,  $\bar{x}_5x_4\bar{x}_2$ ,  $x_5\bar{x}_4\bar{x}_2$ .

Stage 2. Formation of the final answer.

The essence of the stage is the construction of the minimal form of  $BF$  in the form of a disjunctive logical series, the terms of which are those basic parts of  $Q_i$  with  $K=1\dots n$ , in which the informational part of  $\Phi_i$  is equal to "1".

A disjunctive logical series is considered complete – a final answer if the list of indices of all its terms overlaps the indices of the Boolean function. Therefore, not all elements of the final answer can belong to the same disjunctive logical series. a Boolean function has multiple responses, if  $BF$  indices overlap in multiple ways.

1. To form the minimum form of  $BF$ , you need to build a table (Table 11), the columns of which are the indices of  $TI\ BF$  lines, and the rows are the elements of the final answer [7]. If the element of the final answer contains a certain column index, "1" is placed in the corresponding cell. For each column, you need to calculate the sum of "1". Based on the line of sums, construct the answer.

Table 11.1. Table for formation of the final answer (beginning)

| Elements of the final answer | Index digital code                                       | Indexes of the resulting rows |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
|                              |                                                          | 30                            | 28 | 26 | 25 | 24 | 22 | 21 | 20 |
| $\bar{x}_1$                  | 30 28 26 24<br>22 20 18 16<br>14 12 10 08<br>06 04 02 00 | 1                             | 1  | 1  |    | 1  | 1  |    | 1  |
| $\bar{x}_4x_3\bar{x}_2$      | 21 20 05 04                                              |                               |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| $x_4\bar{x}_3\bar{x}_2$      | 25 24 09 08                                              |                               |    |    | 1  | 1  |    |    |    |
| $\bar{x}_5x_3\bar{x}_2$      | 13 12 05 04                                              |                               |    |    |    |    |    |    |    |
| $x_5\bar{x}_3\bar{x}_2$      | 25 24 17 16                                              |                               |    |    | 1  | 1  |    |    |    |
| $\bar{x}_5x_4\bar{x}_2$      | 13 12 09 08                                              |                               |    |    |    |    |    |    |    |
| $x_5\bar{x}_4\bar{x}_2$      | 21 20 17 16                                              |                               |    |    |    |    |    | 1  | 1  |
| A number of sums             |                                                          | 1                             | 1  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2  | 3  |

To form the minimum form of  $BF$ , you need to build a table (Table 11.1-11.3 is divided into 3 parts to accommodate all the columns in the columns of the article), the columns of which are the indexes of  $TI\ BF$  lines, and the rows are the elements of the final answer. If the element of the final answer contains a certain column index, "1" is put in the corresponding cell. For each column, you need to calculate the sum "1". Based on the line of sums, construct the answer.

Table 11.2. Table for formation of the final answer (continuation)

| Elements of the final answer | Index digital code                                       | Indexes of the resulting rows |    |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
|                              |                                                          | 20                            | 18 | 17 | 16 | 14 | 13 | 12 | 10 |
| $\bar{x}_1$                  | 30 28 26 24<br>22 20 18 16<br>14 12 10 08<br>06 04 02 00 | 1                             | 1  |    | 1  | 1  |    | 1  | 1  |
| $\bar{x}_4 x_3 \bar{x}_2$    | 21 20 05 04                                              | 1                             |    |    |    |    |    |    |    |
| $x_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2$    | 25 24 09 08                                              |                               |    |    |    |    |    |    |    |
| $\bar{x}_5 x_3 \bar{x}_2$    | 13 12 05 04                                              |                               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |
| $x_5 \bar{x}_3 \bar{x}_2$    | 25 24 17 16                                              |                               |    | 1  | 1  |    |    |    |    |
| $\bar{x}_5 x_4 \bar{x}_2$    | 13 12 09 08                                              |                               |    |    |    |    | 1  | 1  |    |
| $x_5 \bar{x}_4 \bar{x}_2$    | 21 20 17 16                                              | 1                             |    | 1  | 1  |    |    |    |    |
| A number of sums             |                                                          | 3                             | 1  | 2  | 3  | 1  | 2  | 3  | 1  |

Table 11.3. Table for formation of the final answer (end)

| Elements of the final answer | Index digital code                                       | Indexes of the resulting rows |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|
|                              |                                                          | 09                            | 08 | 06 | 05 | 04 | 02 | 00 |
| $\bar{x}_1$                  | 30 28 26 24<br>22 20 18 16<br>14 12 10 08<br>06 04 02 00 |                               | 1  | 1  |    | 1  | 1  | 1  |
| $\bar{x}_4 x_3 \bar{x}_2$    | 21 20 05 04                                              |                               |    |    | 1  | 1  |    |    |
| $x_4 \bar{x}_3 \bar{x}_2$    | 25 24 09 08                                              | 1                             | 1  |    |    |    |    |    |
| $\bar{x}_5 x_3 \bar{x}_2$    | 13 12 05 04                                              | 1                             | 1  |    |    |    |    |    |
| $x_5 \bar{x}_3 \bar{x}_2$    | 25 24 17 16                                              |                               |    |    |    |    |    |    |
| $\bar{x}_5 x_4 \bar{x}_2$    | 13 12 09 08                                              | 1                             | 1  |    |    |    |    |    |
| $x_5 \bar{x}_4 \bar{x}_2$    | 21 20 17 16                                              |                               |    |    |    |    |    |    |
| A number of sums             |                                                          | 3                             | 4  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  |

**Research results.** The index minimization method is designed as a machine-based minimization method for the use in cluster computing systems to minimize systems of fully defined **BF** containing a large number of arguments. With the increase in the number of arguments in **BF**, the number of possible elements of the final answer of **BF** for the values of the basic coefficient  $K=1...n$  increases exponentially. Therefore, to expand the capabilities of the method and speed up the minimization process, parallelization of the minimization process is used for the slowest time steps. In this case, the minimization algorithm has the following form (Figure 4).

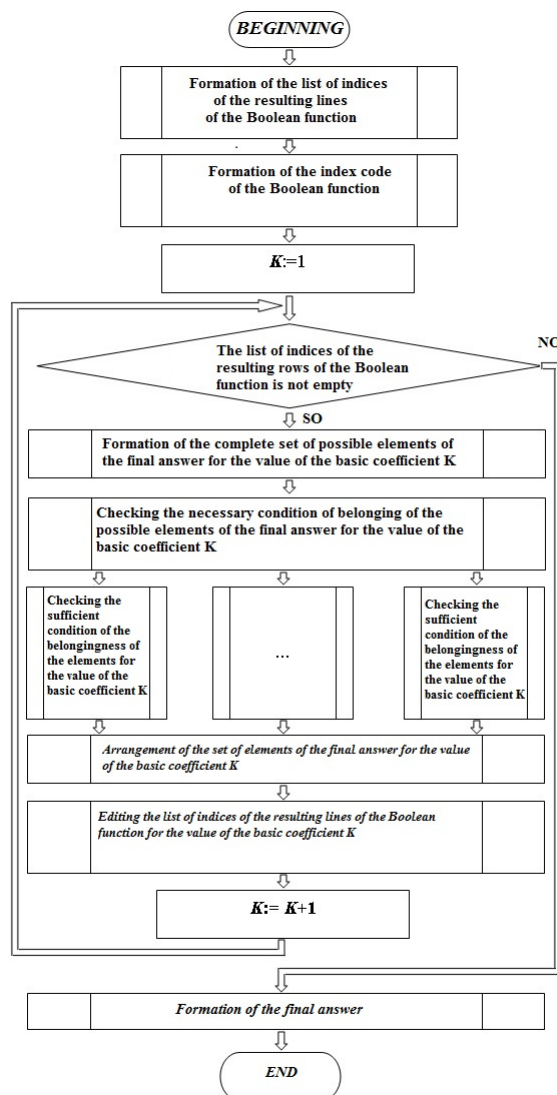


Figure 4. Algorithm of parallelization of the index method of minimization of Boolean functions

**Discussion of the results.** The developed minimization method is one of the constituent parts of creating the software code for the fractal computer. The main feature of a fractal computer is the presence of fractal (non-smooth) functions in its software code, which will radically expand its capabilities in specific areas of calculations. To this day, none of modern computers use these functions in the program code.

**Conclusions.** The article proposes a new method – the index method of minimization of Boolean functions containing a large number of arguments. This method is an implementation of evolutionary development of **BF** minimization methods [8, 9, 10] by reducing the value of the basic coefficient  $K$  with the aim of accelerating the minimization process over time.

**The scientific novelty** consists in the development of a method based on a new form of representation of the Boolean function in the form of a digital index code, which allows to speed up the minimization process in time.

**The practical value** is represented by a software product that, based on the algorithm of de-parallelization of the minimization process using the index method, makes it possible to minimize Boolean functions on cluster computer systems.

The advantages of this method are:

1. During the formation of a complete list of elements, the elements of the final answer are received immediately without defining intermediate results, which significantly speeds up the search.

2. The complete set of possible elements of the final answer for all Boolean functions containing one number of arguments for the value of the basic coefficient  $K=1 \dots n$  is one-one. Therefore, the formation of the set is performed even before the start of the algorithm execution and is used during minimization as a reference value. This significantly reduces the minimization time.

3. The main object of the method implementation is the columns of the truth table of the Boolean function. The use of a list of indexes of the resulting rows reduces the number of rows in the truth table to be processed from  $2^n$  to the number of units in the resulting column. As the value of  $K$  increases, the list of indexes decreases, accordingly, the algorithm speeds up

4. The implementation of two-level processing of the columns of the truth table of the Boolean function – the level of checking the necessary condition and the level of checking the sufficient condition significantly reduce the time of searching for a complete list of elements of the final answer.

5. Processing of the columns of the truth table of the Boolean function when checking the sufficient condition by the method of indices for obtaining the result makes it possible to speed up the processing of a part of the column. Only column elements whose value is equal to "1" are checked, not the entire column, and stop the check early according to the condition of the absence of certain indexes.

6. The formation of the final answer by the index method is the easiest to implement in comparison with the versions of the implementation in previous methods.

7. Parallelization of the minimization process for the most time-consuming phase of the sufficient condition check at the hardware level significantly speeds up the minimization process.

8. The search for new methods of minimization is an integral part of creating elements of the software code of a fractal computer, namely, the development of tools for the implementation of fractal (non-smooth) functions in the software code, which should radically expand the possibilities of using a fractal computer.

## References

- [1] E. McCluskey, "Minimization of Boolean functions", *The Bell System Technical Journal*, vol. 35, pp. 1417-1444, Nov. 1956.
- [2] W. Quine, "The problem of simplifying truth functions", *American Mathematical Monthly*, vol. 59, pp. 521-531, 1952.
- [3] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, 1948.
- [4] Yu. A. Kochkaryev, N. M. Panteleeva, N. L. Kazarinova, and S. A. Shakun, *Classical and alternative minimal forms of logical functions: Reference catalog*. Cherkasy: Cherkasy Institute of Management, 1999 [in Ukrainian].
- [5] O. P. Pinko, "Minimization of CNF of partially monotone Boolean functions", *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, no. 3, pp. 18-21, 2019 [in Ukrainian].
- [6] V. Riznyk, and M. Solomko, "Research of 5-bit boolean functions minimization protocols by combinatorian method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, iss. 2 (42), pp. 41-52, 2018.
- [7] I. P. Chukhrov, "On the minimization of Boolean functions for additive complexity measures", *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, vol. 13, pp. 418-435, 2019.
- [8] V. Riznyk, and M. Solomko, "Minimization of Boolean functions by combinatorial method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, no. 2 (36), pp. 49-64, 2017.
- [9] I. P. Chukhrov, "On the complexity of minimizing quasicyclic Boolean functions", *Diskretn. Anal. Issled.*, Open 25 (3), pp. 126-151, 2018 [*J. Appl. Indust. Math.*, vol. 12, pp. 426-441, 2018].
- [10] Yu. A. Kochkarev, S. V. Burmistrov, and S. F. Aksyonov, "Minimization of Boolean functions by parts", *Radioelektronni ta*

- kompiuterni systemy*, no. 4, pp. 110-116, 2012 [in Ukrainian].
- [11] Yu. A. Kochkarev, S. V. Burmistrov, and S. F. Aksyonov, "Minimization of partially defined Boolean functions in the orthogonal form of representation", *Prykladna radioelektronika*, vol. 12, no. 3, pp. 413-420, 2013 [in Ukrainian].
- [12] Yu. A. Kochkarev, V. N. Rudnytskyi, and S. V. Burmistrov, *Minimization of systems of fully defined Boolean functions in the orthogonal form of representation. Heuristic algorithms and distributed computing in applied problems*: Coll. monograph, Prof. Melnikov (Ed.), iss. 2. Vinnitsa, Kharkiv, 2013, pp. 87-100 [in Ukrainian].
- [13] S. V. Burmistrov, "Parallel decomposition as the main method of minimizing Boolean functions in the orthogonal form of representation", *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu*, no. 2, pp. 67-73, 2014 [in Ukrainian].
- [14] S. V. Burmistrov, and E. N. Panasco, "Parallel decomposition by reducing the value of the basic coefficient K as an alternative method of minimizing Boolean functions", *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky*, no. 1, pp. 189-195, 2015 [in Ukrainian].
- [15] S. V. Burmistrov, and O. B. Piven, "The matrix method of parallel decomposition as a generalized method of minimization in the orthogonal form of representation", *Nauka i tekhnika Povitrianykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy*, no. 4 (21), pp. 151-157, 2015 [in Ukrainian].
- [5] О. П. Пинько, "Мінімізація КНФ частково-монотонних булевих функцій", *Доповіди Національної академії наук України*, № 3, с. 18-21, 2019.
- [6] V. Riznyk, and M. Solomko, "Research of 5-bit boolean functions minimization protocols by combinatorian method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, iss. 2 (42), pp. 41-52, 2018.
- [7] I. P. Chukhrov, "On the minimization of Boolean functions for additive complexity measures", *Journal of Applied and Industrial Mathematics*, vol. 13, pp. 418-435, 2019.
- [8] V. Riznyk, and M. Solomko, "Minimization of Boolean functions by combinatorial method", *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 4, no. 2 (36), pp. 49-64, 2017.
- [9] I. P. Chukhrov, "On the complexity of minimizing quasicyclic Boolean functions", *Diskretn. Anal. Issled.*, Open 25 (3), pp. 126-151, 2018 [*J. Appl. Indust. Math.*, vol. 12, pp. 426-441, 2018].
- [10] Ю. А. Кочкарьов, С. В. Бурмістров, та С. Ф. Аксьонов, "Мінімізація булевих функцій частинами", *Радіоелектронні та комп'ютерні системи*, № 4, с. 110-116, 2012.
- [11] Ю. А. Кочкарьов, С. В. Бурмістров, та С. Ф. Аксьонов, "Мінімізація частково-визначених булевих функцій в ортогональній формі представлення", *Прикладна радіоелектроніка*, т. 12, № 3, с. 413-420, 2013.
- [12] Ю. А. Кочкарьов, В. Н. Рудницький, та С. В. Бурмістров, *Мінімізація систем повністю визначених булевих функцій в ортогональній формі представлення. Евристичні алгоритми та розподілені обчислення у прикладних задачах*: кол. монографія за ред. проф. Мельникова, вип. 2. Вінниця, Харків, 2013, с. 87-100.
- [13] С. В. Бурмістров, "Паралельна декомпозиція як основний метод мінімізації булевих функцій в ортогональній формі представлення", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 67-73, 2014.
- [14] С. В. Бурмістров, та Е. Н. Панаско, "Паралельна декомпозиція шляхом зменшення значення базисного коефіцієнта K як альтернативний метод мінімізації булевих функцій", *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, № 1, с. 189-195, 2015.

#### Список використаних джерел

- [1] E. McCluskey, "Minimization of Boolean functions", *The Bell System Technical Journal*, vol. 35, pp. 1417-1444, Nov. 1956.
- [2] W. Quine, "The problem of simplifying truth functions", *American Mathematical Monthly*, vol. 59, pp. 521-531, 1952.
- [3] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423, 623-656, 1948.
- [4] Ю. А. Кочкарьов, Н. М. Пантелєєва, Н. Л. Казарінова, та С. А. Шакун, *Класичні та альтернативні мінімальні форми логічних функцій*: каталог-довідник. Черкаси: Черкас. ін-т управління, 1999.

[15] С. В. Бурмістров, та О. Б. Півень, "Матричний метод паралельної декомпозиції як узагальнений метод мінімізації в ортогональній формі представлення", *Наука і*

*техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: наук.-техн. журн.*, № 4 (21), с. 151-157, 2015.

[0000-0003-3642-2849] **С. В. Бурмістров**, канд. техн. наук,

e-mail: sergij.burmistrov@ukr.net

[0000-0002-2093-1270] **В. І. Хотунов**, канд. пед. наук, доцент,

[0000-0001-6314-5838] **М. В. Захарова**, канд. техн. наук, доцент,

[0000-0001-9864-3386] **С. Л. Михайлюта**, канд. техн. наук, доцент,

[0000-0002-0248-0461] **М. В. Люта**, завідувач відділення інженерії програмного забезпечення

Черкаський державний бізнес-коледж

вул. В. Чорновола, 243, м. Черкаси, 18028, Україна

## ИНДЕКСНИЙ МЕТОД МІНІМІЗАЦІЇ БУЛЕВИХ ФУНКЦІЙ

У роботі представлено новий метод мінімізації, що реалізує булеву функцію у класичній мінімальній формі представлення шляхом направленої перебору можливих шляхів мінімізації за критеріями необхідної і достатньої умови – індексний метод. Цей метод є продовженням еволюційного розвитку методів мінімізації шляхом зменшення значення базисного коефіцієнта  $K$ : методу мінімізації по частинах, методу паралельної декомпозиції шляхом зменшення  $K$ , матричного методу паралельної декомпозиції. Еволюція методів шляхом зменшення значення базисного коефіцієнта  $K$  йде шляхом досконалого вивчення будови та структурної організації множини булевих функцій, детального аналізу сильних і слабких сторін уже існуючих попередніх варіантів методів, виявлення критичних місць, що суттєво сповільнюють процес мінімізації, та пошуку альтернативних шляхів прискорення процесу мінімізації. Індексний метод розроблено на основі використання нового способу запису окремих булевих функцій у вигляді індексів значущих рядків таблиці істинності. Завдяки такій формі запису вдалося як реалізувати сильні сторони, що використовували попередні методи, так і значно поліпшити слабкі етапи попередніх методів, що в цілому дає великий виграш у часі мінімізації. Перевагою методу є двоетапна мінімізація процесу, що дає можливість безпосередньо не використовувати критерій спрямованого сортування. При формуванні повного списку елементів одразу отримують елементи остаточної відповіді без зазначення проміжних результатів. Структурні елементи методу – повний набір можливих елементів кінцевої відповіді для булевих функцій, що містить одну кількість аргументів для значення базового коефіцієнта  $K=1\dots n$ , – формуються ще до початку виконання методу і використовуються як табличне значення. При реалізації методу в стовпцях таблиці істинності обробляються тільки одиниці без нулів, що зменшує кількість об'єктів обробки. Метод реалізується дворівневою обробкою стовпців – перевіркою необхідних і достатніх умов. Машинна реалізація методу використовує розпаралелювання процесу мінімізації. Все це істотно скорочує час мінімізації – основну цінність, що відрізняє цей метод від інших. Розроблений метод мінімізації є однією зі складових частин створення програмного коду, що є основою розробки фрактального комп'ютера. Головною особливістю фрактального комп'ютера є наявність у його програмному коді фрактальних (негладких) функцій, що дозволить радикально розширити його можливості в окремих областях обчислень. На сьогоднішній день жоден із сучасних комп'ютерів не використовує ці функції в програмному коді.

**Ключові слова:** метод мінімізації булевих функцій, матричний метод паралельної декомпозиції, результативні рядки булевої функції, розпаралелювання процесу мінімізації, базисний коефіцієнт  $K$ , фрактальний комп'ютер.

[0000-0001-9806-3453] **В. В. Хлівний,**

e-mail: vitalik.xlywnij@gmail.com

[0000-0002-1571-401X] **К. В. Базіло, д-р техн. наук, професор**Черкаський державний технологічний університет  
б-р Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

## ВПЛИВ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ РІЗНОМАНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ТОЧНІСТЬ ДОТРИМАННЯ ШИРИНИ РІЗУ

У статті розглянуто питання побудови регресійних моделей для визначення впливу робочих параметрів гідроабразивного різання різноманітних матеріалів на точність дотримання ширини різку. Вхідні параметри включають кількість подачі абразиву, величину тиску ріжучої рідини (води) та в'язкість оброблюваного матеріалу, а вихідний параметр – ширина різку. За допомогою програмного забезпечення *Neuro Solutions* був проведений попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійних моделей. За результатами аналізу була вибрана нейромережа *MLPR-2-B-L* з методом навчання *Levenberg-Marquardt*. Застосування цієї моделі дозволило отримати вагові коефіцієнти, які були використані для передбачення вихідного значення ширини різку на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал та на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу на основі вхідних параметрів. Проведена оцінка похибок, адекватності та інформативності регресійних моделей. Застосування гістограм залишків дозволило проаналізувати отримані результати. Крім того, була розроблена програма в середовищі *MathCAD*, яка дозволяє аналізувати отримані результати і здійснювати передбачення ширини різку за створеною регресійною моделлю як на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал, так і на виході з матеріалу.

Отримані результати визначають важливість вхідних параметрів гідроабразивного різання і демонструють можливість їх використання для передбачення ширини різку. Ця робота має практичне значення для промислових підприємств, що застосовують гідроабразивне різання, оскільки точні передбачення ширини різку дозволяють оптимізувати процес різання, чим забезпечують високу якість та ефективність і точність роботи.

**Ключові слова:** гідроабразивне різання, ширина різку, регресійна модель, зношування абразивного сопла, керованість процесу, точність обробки.

**Вступ.** Гідроабразивне різання є однією з сучасних технологій, використовуваних в промисловості для розрізання різноманітних листових матеріалів з високою точністю та ефективністю. Цей процес використовує комбінацію струменя води й абразивних часточок, які під високим тиском направляються на оброблювану поверхню, спричиняючи розтинання матеріалу та утворення різку. Гідроабразивне різання знайшло широке застосування у виробництві, включаючи важке машинобудування, автомобільну промисловість, аерокосмічну техніку й інші галузі, де вимагається висока якість різання і зниження впливу на структуру матеріалу. Встановлення залежності між вхід-

ними та вихідними параметрами процесу гідроабразивного різання має велике значення для розуміння й оптимізації цього процесу [1, 2].

Обробка матеріалів за допомогою гідроабразивних технологій має деякі переваги. Гідроабразивне різання є доволі універсальною технологією обробки, яку можна використовувати для широкого спектра матеріалів, включаючи метали, скло, кераміку, камінь, пластик тощо. Це дозволяє використовувати одну технологію для різання різних матеріалів, що спрощує виробничий процес. Гідроабразивне різання забезпечує високу точність і деталізацію різку, що дозволяє виконувати складні геометричні форми й отримувати ви-

сокоякісні краї різку з мінімальними відхиленнями. Порівнюючи з іншими методами різання, зауважимо, що гідроабразивне різання майже не впливає на структуру матеріалу через мінімальне виділення тепла, що дозволяє зберігати механічні властивості матеріалу, уникнути спотворень та змін властивостей. Під час гідроабразивного різання немає прямого контакту між ріжучим інструментом і матеріалом, що дозволяє уникнути пошкодження поверхні, зміцнення або формування зони впливу [3, 4].

Проте на сучасному етапі розвитку такої технології притаманні й деякі недоліки, як у технологічному плані, так і в забезпеченні. Так, недоліком гідроабразивних комплексів ГАР-2500 українського виробництва приватного підприємства «Родень» є недостатня керуваність процесу різання, що призводить до збільшення ширини різку та відповідно зменшення точності оброблення листових матеріалів через зношування абразивного сопла. Це може статися через тривалий час виконання керуючої програми, під час якого абразивне сопло зазнає зношування, що впливає на точність обробки матеріалу ближче до завершення програми. Абразивні частинки, що проходять через сопло під високим тиском, згодом викликають механічне зношування його внутрішніх поверхонь, що може призвести до збільшення діаметра отвору сопла та зміни геометрії ріжучого струменя [5].

Тому одним із недоліків технології гідроабразивного різання є зношування абразивного сопла, що може призводити до збільшення ширини різку і відповідно зменшення точності оброблення.

Для вирішення цієї проблеми розробниками обладнання введено параметр корекції, який є числовим параметром і задається тільки на початку різання в керуючій програмі. Цей параметр зміщує ріжучий струмінь в сторону від деталі, котра вирізається, на відстань, рівну половині ширини різку. Такий підхід допомагає компенсувати збільшення ширини різку, що, в свою чергу, забезпечує підтримання точності обробки матеріалу [6].

Проте слід зазначити, що цей метод не є достатньо досконалим у випадку тривалого виконання керуючої програми, коли абразивне сопло зношується і ширина різку збільшу-

ється. Це може призводити до зменшення точності обробки матеріалу ближче до завершення програми. Для вирішення цієї проблеми можуть бути необхідні додаткові покращення, такі як моніторинг зношування абразивного сопла та контролювання збільшення ширини різку під час процесу виконання керуючої програми й автоматичне внесення корекцій у процес різання залежно від ширини різку [7, 8].

Зношування абразивного сопла має безпосередній вплив на точність та якість різку. Збільшення ширини різку може призводити до втрати точності розмірів, особливо при виконанні дрібних або деталізованих різів. Крім того, збільшення ширини різку може мати вплив на ефективність використання матеріалу, збільшуючи його витрати.

Для зменшення негативного впливу зношування абразивного сопла необхідно вживати заходів з контролю за збільшенням ширини різку, наприклад, регулярну перевірку стану сопла і його заміну при необхідності та регулярне вимірювання ширини різку [9].

Визначення параметрів, які можуть впливати на зміну ширини різку, є важливим аспектом для компенсування зношування абразивного сопла та його впливу на ширину різку і точність обробки [10].

Попередні дослідження показують, що вхідні параметри гідроабразивного різання мають значний вплив на якість, продуктивність і точність процесу різання. Однак існує потреба у розробці моделей визначення впливу робочих параметрів гідроабразивного різання різноманітних матеріалів на точність дотримання ширини різку [11].

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення точності дотримання ширини різку при гідроабразивному обробленні різноманітних матеріалів шляхом побудови регресійних моделей впливу робочих режимів різання на вихідний параметр такого оброблення на вході різального струменя в оброблюваний матеріал та на виході.

Для досягнення цієї мети в роботі вирішувалися такі завдання:

- аналіз експериментальних даних і встановлення залежності між вхідними та вихідними параметрами процесу гідроабразивного різання;

- побудова регресійних моделей, які найкращим чином описують залежність між їх вхідними та вихідним параметрами;

- перевірка адекватності та точності побудованих моделей шляхом порівняння її результатів з експериментальними даними;

- надання рекомендацій щодо впливу вхідних параметрів на ширину різку та надання рекомендації для оптимізації процесу гідроабразивного різання.

### Виклад основного матеріалу

**Побудова регресійних моделей**  
 $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$

Різниця в ширині різку між входом і виходом з матеріалу є однією з ключових характеристик гідроабразивного різання і важливою величиною, яка впливає на якість і точність різку, а також на продуктивність і витрати матеріалу, тому в цьому дослідженні створено саме дві регресійні моделі для передбачення ширини різку на вході та виході з матеріалу ріжучого струменя.

За попередньо виміряними з дослідних зразків вхідними даними, які бралися з різних матеріалів, що мають різну в'язкість і з різними параметрами різання, а саме зі зміною робочого тиску ріжучої рідини та зміною кількості подачі абразиву, в програмі Neuro Solutions здійснено попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  (що дозволить передбачати ширину різку на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал), який зображено на рисунку 1, де  $Y_1$  – вихідний параметр, ширина різку, мм;  $X_1$  – вхідний параметр, кількість подачі абразиву, гр./хв;  $X_2$  – робочий тиск ріжучої рідини, атм.;  $X_3$  – в'язкість матеріалу дослідних зразків, Дж/см<sup>2</sup>. Аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  (що дозволить передбачати ширину різку на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу) відбувався аналогічно до регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ .

При такому аналізі вихідні дані розбиваються на три вибірки: навчальну – 60 %, тестову – 25 % і крос-валідаційну (CV) – 15 %. При цьому можливе використання різноманітних методів навчання.

Express Report

Summary of All Networks

| Model Name                        | Training |          | Cross Validation |          | Testing  |          |
|-----------------------------------|----------|----------|------------------|----------|----------|----------|
|                                   | RMSE     | MAE      | RMSE             | MAE      | RMSE     | MAE      |
| MLPR-1-0-M (Regression MLP)       | 0.094823 | 0.080901 | 0.094823         | 0.080901 | 0.094823 | 0.080901 |
| MLPR-1-B-L (Regression MLP)       | 0.096029 | 0.080003 | 0.077448         | 0.066477 | 0.077448 | 0.066477 |
| MLPR-2-B-L (Regression MLP)       | 0.07222  | 0.020091 | 0.057346         | 0.038388 | 0.075744 | 0.030341 |
| MLPR-1-B-R (Regression MLP)       | 0.096167 | 0.087944 | 0.073796         | 0.064329 | 0.079044 | 0.060105 |
| MLPR-2-0-M (Regression MLP)       | 0.099554 | 0.083683 | 0.074807         | 0.060405 | 0.079044 | 0.060105 |
| MLPR-2-B-R (Regression MLP)       | 0.091812 | 0.084701 | 0.067            | 0.056887 | 0.079044 | 0.060105 |
| RBF-1-0-M (Radial Basis Function) | 0.120009 | 0.077708 | 0.09553          | 0.077448 | 0.077448 | 0.066477 |

Summary of Best-Performing Networks

Model Name: MLPR-1-0-M (Regression MLP)

Breakboard Location: E:\OneDrive\Documents\NeuroSolutions\дани для моделі регресії - нові MLPR-1-0-M (Regression MLP).nsb

| Performance Metrics       |          |
|---------------------------|----------|
| # of Rows                 | 137      |
| RMSE                      | 0.094823 |
| Correlation (r)           | 0.800003 |
| Min Absolute Error        | 0.000191 |
| Max Absolute Error        | 0.3911   |
| Mean Absolute Error (MAE) | 0.080901 |

Рисунок 1. Результати попереднього аналізу щодо визначення архітектури нейромережі

Як показує попередній аналіз для регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ , найкращі результати на тестовій та CV вибірках отримано для наступних архітектур MLPR – 1-0-M із кількістю нейронів прихованого шару  $n = 10$ .

Далі виконано детальний аналіз запропонованих архітектур і за результатами визначено остаточну архітектуру нейромережі. Такий детальний аналіз за похибкою MAE (mean absolute error performance function) та коефіцієнтом детермінації показує найкращі результати для архітектури нейромережі з двома прихованими шарами MLPR-2-B-L та методом навчання Levenberg-Marquardt.

В цьому дослідженні кількість нейронів першого та другого прихованого шару варіювалася від 10 до 40 і найкращі результати за похибкою MAE навчальної та CV вибірок має наступна архітектура MLPR-2-30-15-1(LM), яка зображена на рисунку 2.

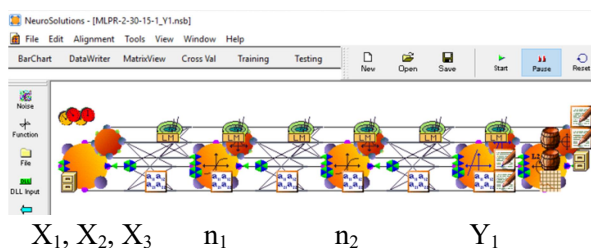


Рисунок 2. Нейронна мережа MLPR-2-30-15-1(LM):

$X_1, X_2, X_3$  – вхідні параметри нейромережі;  
 прихований шар 1 із кількістю нейронів у шарі  $n_1$ ;  
 прихований шар 2 із кількістю нейронів у шарі  $n_2$ ;  
 $Y_1$  – вихідний шар нейромережі

Для регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  найкращі результати на тестовій та CV вибірках отримано для наступних архітектур MLPR – 2-B-L із кількістю нейронів прихованих шарів  $n_1=10$ ,  $n=8$ .

Кількість нейронів першого та другого прихованого шару варіювалася, як і в попередньому випадку, при цьому найкращі результати для побудови регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  за похибкою MAE навчальної та CV вибірок має наступна архітектура MLPR-2-25-15-1(LM), яка має зовнішній вигляд, аналогічний до архітектури нейромережі для регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ , (нейромережі відрізняються кількістю нейронів у прихованих шарах).

В результаті навчання нейромереж отримано вагові коефіцієнти (також відомі як параметри моделі), які є числовими значеннями, що визначають вплив кожної вхідної змінної на вихід моделі. Вони є результатом процесу навчання нейронної мережі з використанням даних навчання.

Отримані вагові коефіцієнти відображають «знання», які нейронна мережа набула під час навчання на вхідних даних та надалі будуть використовуватися для отримання передбачення вихідного значення  $Y_1$  за результатами  $X_1, X_2, X_3$ . Чим більша точність моделі, тим більш значущими й точними є вагові коефіцієнти [12].

Результати роботи отриманих нейромереж для навчальної, тестової, CV вибірок і декількох передбачуваних значень для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано на рисунку 3, для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  – на рисунку 4.

Отримані числові результати регресійного аналізу  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано в таблиці 1, де стовпчик 1 – це номінальне значення параметра  $Y_1$ , стовпчик 2 – отримане значення  $Y_1$  за допомогою НМ MLPR-2-30-15-1(LM), стовпчик 3 – відносна похибка  $\delta_i$ , %, розрахована в кожній точці вихідних даних.

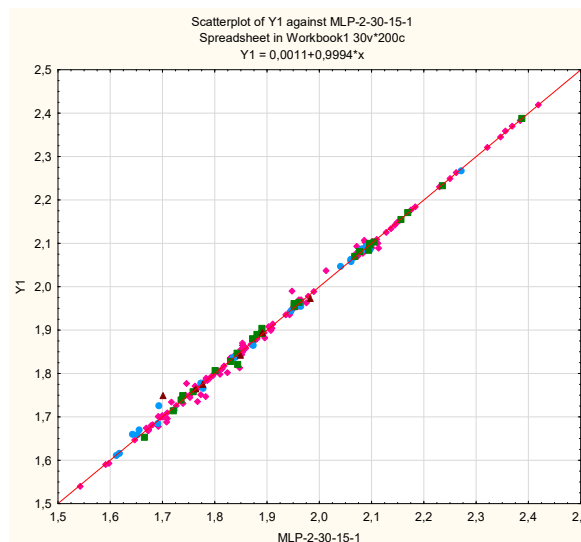


Рисунок 3. Діаграма розсіювання ( $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ )

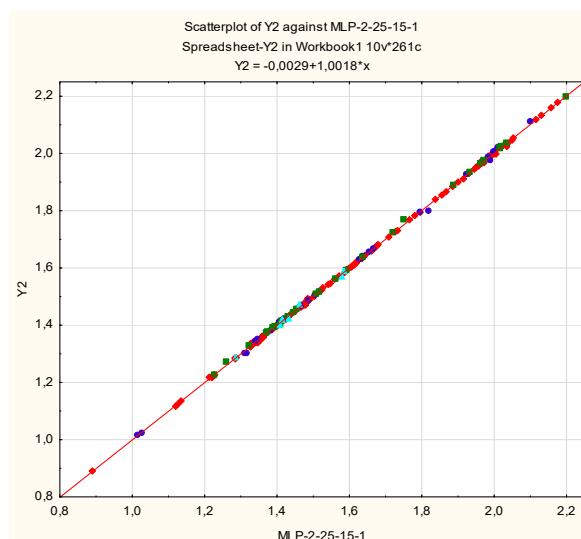


Рисунок 4. Діаграма розсіювання ( $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ )

Отримані числові результати регресійного аналізу  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  показано в таблиці 2, де стовпчик 1 – це номінальне значення параметра  $Y_2$ , стовпчик 2 – отримане значення  $Y_2$  за допомогою НМ MLPR-2-25-15-1(LM), стовпчик 3 – відносна похибка  $\delta_i$ , %, розрахована в кожній точці вихідних даних.

Таблиця 1. Результати регресійного аналізу  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

| №   | $Y_1$  | $Y_1$ регр. | Відносна похибка $\delta_i$ , % |
|-----|--------|-------------|---------------------------------|
| 1   | 1.99   | 1.9477      | 2.1239                          |
| 2   | 1.96   | 1.9546      | 0.2708                          |
| 3   | 1.7010 | 1.6916      | 0.5513                          |
| 4   | 1.9138 | 1.9109      | 0.1503                          |
| 5   | 1.6694 | 1.6726      | -0.1924                         |
| 6   | 1.7460 | 1.7373      | 0.4977                          |
| 7   | 2.0766 | 2.0833      | -0.3259                         |
| 8   | 1.7617 | 1.7643      | -0.1492                         |
| 9   | 1.7503 | 1.7519      | -0.0904                         |
| 10  | 1.7688 | 1.7697      | -0.0487                         |
| 11  | 1.8432 | 1.8486      | -0.2894                         |
| 12  | 1.9783 | 1.9789      | -0.0312                         |
| 13  | 2.0914 | 2.0896      | 0.08729                         |
| 14  | 1.9625 | 1.9752      | -0.6465                         |
| 15  | 1.8778 | 1.8756      | 0.1170                          |
| 16  | 2.0367 | 2.0127      | 1.1782                          |
| 17  | 1.6802 | 1.6783      | 0.1140                          |
| 18  | 1.8598 | 1.8584      | 0.0786                          |
| 19  | 2.0899 | 2.1007      | -0.5140                         |
| 20  | 2.3453 | 2.3467      | -0.0608                         |
| ... | ...    | ...         | ...                             |
| 180 | 2.3877 | 2.3872      | 0.0195                          |
| 181 | 1.8210 | 1.8437      | -1.2473                         |
| 182 | 2.0997 | 2.0966      | 0.1497                          |
| 183 | 1.6532 | 1.6652      | -0.7300                         |
| 184 | 2.2334 | 2.2354      | -0.0895                         |
| 185 | 2.0967 | 2.0963      | 0.0209                          |
| 186 | 1.9610 | 1.9515      | 0.4822                          |
| 187 | 1.8796 | 1.8721      | 0.3971                          |
| 188 | 2.1027 | 2.1047      | -0.0922                         |
| 189 | 1.7137 | 1.7204      | -0.3878                         |
| 190 | 1.8282 | 1.8303      | -0.1093                         |
| 191 | 1.8066 | 1.8004      | 0.3410                          |
| 192 | 2.1705 | 2.1690      | 0.0672                          |
| 193 | 2.0979 | 2.0959      | 0.0972                          |
| 194 | 1.9539 | 1.9524      | 0.0742                          |
| 195 | 1.8942 | 1.8909      | 0.1765                          |
| 196 | 1.7746 | 1.7771      | -0.1411                         |
| 197 | 1.7490 | 1.7010      | 2.7421                          |
| 198 | 1.7645 | 1.7634      | 0.0644                          |
| 199 | 1.8419 | 1.8490      | -0.3857                         |
| 200 | 1.9725 | 1.9825      | -0.5074                         |

Таблиця 2. Результати регресійного аналізу  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

| №   | $Y_2$  | $Y_2$ регр. | Відносна похибка $\delta_i$ , % |
|-----|--------|-------------|---------------------------------|
| 1   | 1.68   | 1.6796      | 0.0181                          |
| 2   | 1.56   | 1.5585      | 0.0932                          |
| 3   | 1.3476 | 1.3513      | -0.2758                         |
| 4   | 1.5250 | 1.5234      | 0.1012                          |
| 5   | 1.1172 | 1.1188      | -0.1443                         |
| 6   | 1.3978 | 1.3996      | -0.1230                         |
| 7   | 1.9522 | 1.9513      | 0.0466                          |
| 8   | 1.4074 | 1.4060      | 0.0974                          |
| 9   | 1.4012 | 1.4052      | -0.2889                         |
| 10  | 1.4256 | 1.4245      | 0.0779                          |
| 11  | 1.4715 | 1.4724      | -0.0585                         |
| 12  | 1.6323 | 1.6334      | -0.0674                         |
| 13  | 1.9989 | 2.0048      | -0.2932                         |
| 14  | 1.6099 | 1.6120      | -0.1331                         |
| 15  | 1.2201 | 1.2223      | -0.1787                         |
| 16  | 1.6190 | 1.6189      | 0.0090                          |
| 17  | 1.1362 | 1.1347      | 0.1342                          |
| 18  | 1.5303 | 1.5271      | 0.2111                          |
| 19  | 1.9941 | 1.9882      | 0.2957                          |
| 20  | 1.8564 | 1.8559      | 0.0262                          |
| ... | ...    | ...         | ...                             |
| 180 | 1.8890 | 1.8882      | 0.0381                          |
| 181 | 1.4547 | 1.4529      | 0.1198                          |
| 182 | 2.0250 | 2.0177      | 0.3604                          |
| 183 | 1.3275 | 1.3226      | 0.3723                          |
| 184 | 1.7703 | 1.7511      | 1.0857                          |
| 185 | 2.0156 | 2.0159      | -0.0148                         |
| 186 | 1.5920 | 1.5906      | 0.0882                          |
| 187 | 1.2274 | 1.2280      | -0.0517                         |
| 188 | 2.0344 | 2.0339      | 0.0222                          |
| 189 | 1.3734 | 1.3714      | 0.1492                          |
| 190 | 1.3961 | 1.3946      | 0.1032                          |
| 191 | 1.4438 | 1.4448      | -0.0728                         |
| 192 | 1.7219 | 1.7194      | 0.1464                          |
| 193 | 2.0193 | 2.0172      | 0.1034                          |
| 194 | 1.5881 | 1.5864      | 0.1027                          |
| 195 | 1.2875 | 1.2883      | -0.0624                         |
| 196 | 1.4173 | 1.4151      | 0.1595                          |
| 197 | 1.4001 | 1.4101      | -0.7097                         |
| 198 | 1.4207 | 1.4330      | -0.8677                         |
| 199 | 1.4705 | 1.4618      | 0.5905                          |
| 200 | 1.5696 | 1.5802      | -0.6749                         |

**Оцінка похибок, адекватності й інформативності отриманої регресійної моделі**

Оцінку похибок отриманих регресійних моделей виконано за допомогою загальновідомих формул: середньоквадратична помилка MSE (mean squared error performance function), сума квадратів відхилень SSE (sum squared error performance function), середня абсолютна похибка MAE (mean absolute error performance

function), сума відносних відхилень SRE (sum relative error performance function), середня відносна похибка MARE (mean absolute relative error performance function) або MAPE (mean absolute percentage error performance function) [13].

Результати розрахованих значень похибок вказані в таблиці 3 (для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ ) та таблиці 4 (для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ ).

Таблиця 3. Зведена таблиця розрахованих значень похибок для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

| Похибка | Навчальна<br>$N=140$ | Тестова<br>$N=26$ | CV<br>$N=28$ | Передбачення<br>$N=6$ |
|---------|----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| MSE     | 9.57142e-5           | 8.92307e-5        | 5.35714e-5   | 0.0004                |
| SSE     | 0.0134               | 0.00232           | 0.0015       | 0.0024                |
| MAE     | 0.00572              | 0.00638           | 0.00539      | 0.0118                |
| SRE     | 0.428                | 0.092             | 0.0805       | 0.0397                |
| MAPE, % | 0.305                | 0.354             | 0.287        | 0.663                 |

Таблиця 4. Зведена таблиця розрахованих значень похибок для  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ 

| Похибка | Навчальна<br>$N=139$ | Тестова<br>$N=26$ | CV<br>$N=28$ | Передбачення<br>$N=7$ |
|---------|----------------------|-------------------|--------------|-----------------------|
| MSE     | 8.58992e-6           | 5.03846e-5        | 2.21428e-5   | 6.58571e-5            |
| SSE     | 0.00119              | 0.00131           | 0.00062      | 0.000461              |
| MAE     | 0.00189              | 0.00439           | 0.00276      | 0.00651               |
| SRE     | 0.17                 | 0.0708            | 0.0496       | 0.0312                |
| MAPE, % | 0.122                | 0.272             | 0.177        | 0.446                 |

Перевірку адекватності й інформативності метамоделей здійснено за допомогою загальновідомого критерію Фішера і шляхом розрахунку множинного коефіцієнта кореляції  $R^2$  та перевірки його статистичної значущості [14].

Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-30-15-1(LM) зображені в таблиці 5, для регресійної НМ MLPR-2-25-15-1(LM) – в таблиці 6.

Таблиця 5. Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-30-15-1(LM)

| Компонент дисперсії $N=200$ | Сума квадратів | Середній квадрат  | Дисперсія              | Стандартна похибка оцінки |
|-----------------------------|----------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| регресії                    | $SS_D=6.607$   | $MS_D=2.202$      | $\sigma_D^2=0.0332$    | $s_D=0.1822$              |
| залишків                    | $SS_R=0.01973$ | $MS_R=1.00663e-4$ | $\sigma_R^2=1.0066e-4$ | $s_R=0.01003$             |
| загальної                   | $SS_T=6.62673$ | $MS_T=0.0333$     | $\sigma_T^2=0.0333$    | $s_T=0.18248$             |

Таблиця 6. Результати розрахунку щодо оцінки адекватності й інформативності створеної регресійної НМ MLPR-2-25-15-1(LM)

| Компонент дисперсії $N=200$ | Сума квадратів  | Середній квадрат     | Дисперсія                  | Стандартна похибка оцінки |
|-----------------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|
| регресії                    | $SS_D=14.569$   | $MS_D=4.856$         | $\sigma_D^2=0.073211$      | $s_D=0.27057$             |
| залишків                    | $SS_R=0.00359$  | $MS_R=1.831*10^{-5}$ | $\sigma_R^2=1.831*10^{-5}$ | $s_R=0.004279$            |
| загальної                   | $SS_T=14.57259$ | $MS_T=0.073229$      | $\sigma_T^2=0.073229$      | $s_T=0.2706$              |

Отримана регресійна модель  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  має середню похибку апроксимації  $MAPE = 0.32\%$ , експериментальне значення показника Фішера  $F_{3;196}^{експ} = 21874$ , а критичне значення цього критерію з рівнем значущості  $\alpha = 5\%$  та числом ступенів свободи  $\nu_R = 196$ ,  $\nu_D = 3$  становить  $F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит} = F_{0,05;3;196}^{крит} = 2,65$ .

Отже, умова  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} > F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит}$ , де  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується, регресійна модель

адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить дійсності.

Регресійна модель інформативна, оскільки  $R^2 > 0,95$  (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0.997$ ), та значимо достовірна за  $F$ -критерієм при рівні значущості  $5\%$ , оскільки умова  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} > F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит}$ , де  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується для експериментального значення  $F_{3;196}^{експ} = 21601$ .

Отримана регресійна модель  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  має середню похибку апроксимації  $MAPE = 0.161\%$ , експериментальне значення показника Фішера  $F_{3;196}^{експ} = 265210$ , а критичне значення цього критерію з рівнем значущості  $\alpha = 5\%$  та числом ступенів свободи  $\nu_R = 196$ ,  $\nu_D = 3$  становить  $F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит} = F_{0,05;3;196}^{крит} = 2,65$ .

Отже, умова  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} > F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит}$ , де  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується, регресійна модель

адекватна і прогноз результатів по моделі не суперечить дійсності.

Регресійна модель інформативна, оскільки  $R^2 > 0,95$  (коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0.99975$ ), та значимо достовірна за  $F$ -критерієм при рівні значущості  $5\%$ , оскільки умова  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} > F_{\alpha; \nu_D; \nu_R}^{крит}$ , де  $F_{\nu_D; \nu_R}^{експ} = \frac{MS_D}{MS_R}$  виконується для експериментального значення  $F_{3;196}^{експ} = 259935$ .

#### Аналіз отриманих результатів за гістограмою залишків

Залишки моделі – це різниця між фактичними значеннями залежної змінної та передбачуваними значеннями, які отримані з

регресійної моделі. Гістограма розподілу показує частоту, з якою значення залишків потрапляють у кожний інтервал значень.

Якщо гістограма розподілу залишків має нормальний розподіл, це свідчить про те, що регресійна модель досить точно передбачає значення залежної змінної, і немає систематичних помилок у передбаченнях.

Отже, аналіз залишків регресійної моделі за допомогою гістограми розподілу є важливим інструментом для перевірки точності регресійної моделі і виявлення можливих помилок у моделі.

Здійснено аналіз залишків за допомогою гістограм розподілу, які зображені на рисунках 5 та 6.

Візуальний аналіз гістограм залишків (рисунки 5, 6) показує, що вони розподілені за нормальним законом. Це, в свою чергу, означає, що моделі досить точно передбачають значення залежної змінної, і немає систематичних помилок у передбаченнях.

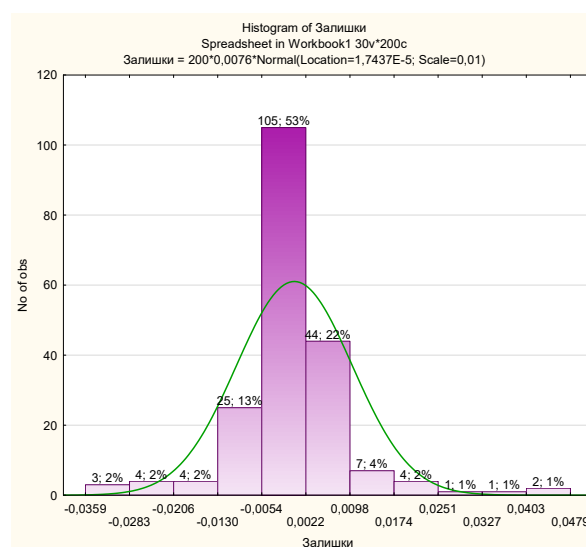


Рисунок 5. Гістограма залишків регресійної моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$

В середовищі MathCAD розроблено модель, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення за створеною регресійною моделлю  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  на основі НМ MLPR-2-30-15-1(LM) та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$  на основі НМ MLPR-2-25-15-1(LM).

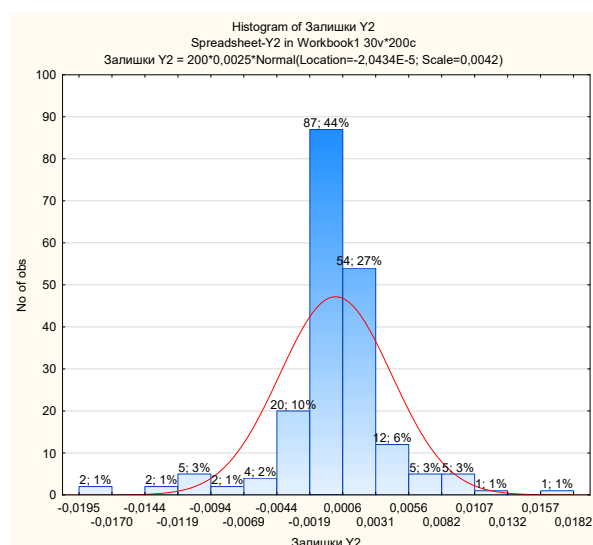


Рисунок 6. Гістограма залишків регресійної моделі  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$

В цій розробленій моделі передбачено нормалізацію вхідних даних – процес приведення значень вхідних змінних до специфічного діапазону або розподілу, щоб забезпечити оптимальну роботу моделі і покращити її збіжність. Використаний метод нормалізації

$$Y_{\text{регр.}} = \sum_{m=1}^{\text{number2}} \left( \alpha_{\text{out}m} \cdot th \left( \left( \sum_{k=1}^{\text{number1}} \left( \left( w_2^{(k)} \right)_m \cdot \left( th \left( \sum_{j=1}^{\text{number input}} \left[ \left( w_1^{(j)} \right)_k \cdot \left( X^{(j)} \right) \right] + b_{1k} \right) \right) \right) \right) + b_{2m} \right) \right) + b_{\text{out}} , \quad (1)$$

де  $\alpha_{\text{out}}$  – вагові коефіцієнти вихідного шару нейромережі вхідних параметрів;  $th$  – активувальна функція;  $w_2$  – вагові коефіцієнти 2-го прихованого шару нейромережі;  $w_1$  – вагові коефіцієнти 1-го прихованого шару нейромережі;  $X$  – нормалізація вхідних даних, за якими відбувається передбачення ширини різу;  $b_1$  – вагові коефіцієнти зміщення 1-го прихованого шару нейромережі;  $b_2$  – вагові коефіцієнти зміщення 2-го прихованого шару нейромережі;  $b_{\text{out}}$  – вагові коефіцієнти зміщення вихідного шару нейромережі.

**Результати досліджень.** За результатами роботи було визначено вхідні параметри гідроабразивного різання, які включають кількість подачі абразиву, величину тиску ріжучої рідини (води) та в'язкість оброблюваного матеріалу. Ці параметри використовуються для передбачення вихідного параметра – ширини різу. Виконано попередній аналіз можливих архітектур нейромереж для побудови регресійних моделей за допомогою спеціальної

відомий як тангенціальна нормалізація (tanh normalization). Цей метод застосовує гіперболічний тангенс (tanh) для нормалізації даних. Тангенціальна нормалізація часто використовується в нейромережних моделях, оскільки гіперболічний тангенс є нелінійною активувальною функцією, яка може приймати значення від -1 до 1. Це дозволяє зберегти інформацію про відносні розміри та взаємодії між змінними.

Відповідно виконана денормалізація вихідних даних (відновлення оригінальних значень після застосування нормалізації). Це важливий крок після отримання моделлю прогнозованих значень, які знаходяться в нормалізованому форматі і потребують повернення до їх вихідної шкали) [15, 16].

Розроблені моделі реалізують рівняння регресійної моделі (1) для передбачення ширини різу на вході та виході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал щодо таких вхідних параметрів, як величина тиску ріжучої рідини, кількість подачі абразиву, в'язкість матеріалу.

програми Neuro Solutions і на основі результатів попереднього аналізу було вибрано нейромережу MLPR-2-B-L з методом навчання Levenberg-Marquardt для  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ , отримано вагові коефіцієнти цих нейромереж, що були використані для отримання передбачення вихідного значення  $Y_1$  (ширина різу на вході ріжучого струменя в оброблюваний матеріал) та  $Y_2$  (ширина різу на виході ріжучого струменя з оброблюваного матеріалу) за результатами  $X_1, X_2, X_3$ . Також було проведено оцінку похибок, адекватності й інформативності отриманих регресійних моделей і проведено аналіз отриманих результатів за гістограмами залишків. На основі цих досліджень була розроблена програма в середовищі MathCAD, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення за створеними регресійними моделями  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ .

Результати роботи отриманих з Neuro Solutions нейромереж зображені у вигляді діаграми розсіювання (рисунки 3, 4). Результат проведення оцінок похибок зображений у вигляді таблиць (таблиці 3, 4), аналіз інформативності та адекватності регресійних моделей зображений у вигляді таблиць (таблиці 5, 6), аналіз отриманих залишків моделі зображений у вигляді гістограми (рисунки 5, 6). Також продемонстровані рівняння регресійних моделей, які реалізує створена програма у середовищі MathCAD для здійснення передбачення.

**Обговорення результатів.** Отже, із залученням спеціального програмного забезпечення Neuro Solutions та MathCAD створено регресійні моделі  $Y_1 = f(X_1, X_2, X_3)$  та  $Y_2 = f(X_1, X_2, X_3)$ , які дозволяють з високою точністю (розбіжність між результатами, отриманими за допомогою регресійної моделі, й експериментально отриманими даними становить 0,305 – 0,663 % для  $Y_1$  і 0,122 % – 0,446 % для  $Y_2$ ) визначати ширину різку щодо різних входних параметрів різання (кількість подачі абразиву, робочий тиск ріжучої рідини, в'язкість оброблюваного матеріалу).

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження були визначені входні параметри гідроабразивного різання (кількість подачі абразиву, величина тиску робочого середовища – води та в'язкість оброблюваного матеріалу), що використовуються для встановлення вихідного параметра – точності дотримання ширини різку.

Попередній аналіз різних архітектур нейромереж, здійснений за допомогою програми Neuro Solutions, показав, що найбільш оптимальними є нейромережа MLPR-2-B-L з методом навчання Levenberg-Marquardt. За допомогою цієї моделі були отримані вагові коефіцієнти, які використовуються для передбачення значення ширини різку ( $Y_1$ ), ( $Y_2$ ) на основі входних параметрів ( $X_1, X_2, X_3$ ).

Було проведено оцінку похибок, адекватності й інформативності регресійних моделей, а також здійснено аналіз отриманих результатів за гістограмами залишків, що дозволяє зробити висновки про точність розроблених моделей.

На основі проведених досліджень була розроблена програма в середовищі MathCAD, яка дозволяє аналізувати отримані результати та здійснювати передбачення ширини різку за

допомогою розробленої регресійної моделі. Ця програма може бути використана для практичного застосування в галузі гідроабразивного різання листових матеріалів, забезпечуючи більш точні й ефективні результати.

*Наукова новизна:* в результаті проведеного дослідження вперше встановлено залежність входних параметрів гідроабразивного різання, таких як: кількість подачі абразиву, величина тиску робочої рідини (води) і в'язкість оброблюваного матеріалу, та їх впливу на точність дотримання ширини різку. Проведені дослідження підтверджують важливість цих параметрів у процесі різання матеріалів і надають підґрунтя для подальшого розвитку оптимальних стратегій контролю цих факторів. Також вперше було використано метод навчання Levenberg-Marquardt для побудови регресійної моделі з використанням нейромереж, що дозволяє дотримуватися заданої ширини різку на основі входних параметрів з високою точністю. Розроблена програма в середовищі MathCAD надає зручний інструмент для аналізу отриманих результатів та обрання найбільш раціонального режиму гідроабразивного різання, що сприяє ефективній оптимізації процесу оброблення.

*Практична значущість* цієї роботи полягає в тому, що розроблена регресійна модель може бути використана в промисловості для оптимізації процесу гідроабразивного різання. Знання входних параметрів, які впливають на точність дотримання ширини різку, дозволяють налаштувати обладнання і регулювати параметри різання для досягнення необхідної якості оброблення.

Застосування розробленої регресійної моделі дозволяє визначати необхідну ширину різку із заданою точністю на основі входних даних без потреби у проведенні додаткових експериментів. Це значно зекономить час та ресурси, які раніше були витрачені на тестування різних комбінацій параметрів.

Крім того, розроблені методи аналізу та моделювання можуть бути використані для вдосконалення систем автоматичного керування гідроабразивними комплексами, що дозволить забезпечити більш точне і стабільне керування процесом різання, підвищити якість оброблення матеріалів та знизити відхилення від заданих параметрів.

Отже, практична значущість роботи полягає в покращенні ефективності та якості гідроабразивного різання, а також у зниженні

витрат часу та ресурсів на експериментальні дослідження та налаштування обладнання.

У подальших дослідженнях планується провести дослідження на різних типах матеріалів та за різних умов різання. Для підтвердження результатів моделювання будуть проведені експериментальні випробування в реальних умовах дії гідроабразивних систем. Це дозволить порівняти отримані результати з практичними даними та оцінити ефективність розробленої моделі.

### Список використаних джерел

- [1] R. Vijayakumar, N. Srirangarajalu, M. Santhanakumar, N. E. Edwin Paul, and M. Rajesh, "Investigation of abrasive aqua jet hole making (AAJHM) parameters using desirability analysis on Inconel-625 space alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 311-328, 2023. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.008.
- [2] R. K. Thakur, and K. K. Singh, "Evaluation of hole quality to explore the influence of graphene nanoplatelets embedded in epoxy/carbon composite during abrasive water jet drilling", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 85, pp. 569-583, 2023. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.054.
- [3] J. Chen, Y. Yuan, H. Gao, T. Zhou, and Z. Wu, "Predictive modeling approach for the jet lag in multi-pass cutting of thick materials using abrasive waterjet", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 83, pp. 143-156, 2022. ISSN 1526-6125. doi: 10.1016/j.jmapro.2022.08.059.
- [4] Zh. Liao, D. Xu, D. Axinte, J. Diboine, and A. Wretland, "Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy", *CIRP Annals*, vol. 70, iss. 1, pp. 155-158, 2021. ISSN 0007-8506. doi: 10.1016/j.cirp.2021.03.007.
- [5] X. Liu, Z. Liang, G. Wen et al., "Waterjet machining and research developments: a review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1257-1335, 2019. doi: 10.1007/s00170-018-3094-3.
- [6] "Про технологію гідроабразивного різання матеріалів" [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.roden.ua/waterjet-cutting-technology.html#>. Дата звернення: Квіт. 1, 2023.
- [7] J. J. R. Jegaraj, and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 12-13, pp. 1443-1450, 2005. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.020.
- [8] M. Monno, and C. Ravasio, "The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 3, pp. 355-363, 2005. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.010.
- [9] D. A. Axinte, D. S. Srinivasu, M. C. Kong, and P. W. Butler-Smith, "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, iss. 10, pp. 797-803, 2009. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.003.
- [10] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, iss. 12, pp. 1297-1306, 2002. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [11] J. Billingham, C. B. Miron, D. A. Axinte, and M. C. Kong, "Mathematical modelling of abrasive waterjet footprints for arbitrarily moving jets: Part II – Overlapped single and multiple straight paths", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 68, pp. 30-39, 2013. ISSN 0890-6955. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.003.
- [12] С. О. Субботін, *Нейронні мережі: теорія та практика*. Житомир, Україна: Вид. О. О. Євенок, 2020.
- [13] А. О. Олійник, С. О. Субботін, та О. О. Олійник, *Інтелектуальний аналіз даних*. Запоріжжя, Україна: ЗНТУ, 2012. ISBN 978-617-529-052-1.
- [14] В. Я. Гальченко, Р. В. Трембовецька, та В. В. Тичков, "Застосування нейрокомп'ютинга на етапі побудови метамodelей в процесі оптимального сурогатного синтезу антен", *Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування*, № 74, с. 60-72, 2018. doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.

- [15] В. О. Гороховатський, та І. С. Творошенко, *Методи інтелектуального аналізу та оброблення даних*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2021.  
doi: 10.30837/978-966-659-298-2.
- [16] П. М. Павленко, С. Ф. Філоненко, О. М. Чередніков, та В. В. Трейтяк, *Математичне моделювання систем і процесів*. Київ, Україна: НАУ, 2017.
- ### References
- [1] R. Vijayakumar, N. Srirangarajulu, M. Santhanakumar, N. E. Edwin Paul, and M. Rajesh, "Investigation of abrasive aqua jet hole making (AAJHM) parameters using desirability analysis on Inconel-625 space alloy", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 311-328, 2023. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2023.03.008.
- [2] R. K. Thakur, and K. K. Singh, "Evaluation of hole quality to explore the influence of graphene nanoplatelets embedded in epoxy/carbon composite during abrasive water jet drilling", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 85, pp. 569-583, 2023. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.054.
- [3] J. Chen, Y. Yuan, H. Gao, T. Zhou, and Z. Wu, "Predictive modeling approach for the jet lag in multi-pass cutting of thick materials using abrasive waterjet", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 83, pp. 143-156, 2022. ISSN 1526-6125.  
doi: 10.1016/j.jmapro.2022.08.059.
- [4] Zh. Liao, D. Xu, D. Axinte, J. Diboine, and A. Wretland, "Surface formation mechanism in waterjet guided laser cutting of a Ni-based superalloy", *CIRP Annals*, vol. 70, iss. 1, pp. 155-158, 2021. ISSN 0007-8506.  
doi: 10.1016/j.cirp.2021.03.007.
- [5] X. Liu, Z. Liang, G. Wen et al., "Waterjet machining and research developments: a review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1257-1335, 2019.  
doi: 10.1007/s00170-018-3094-3.
- [6] "On the technology of hydroabrasive cutting of materials" [Online]. Available: <https://www.roden.ua/waterjet-cutting-technology.html#>. Accessed on: April 1, 2023 [in Ukrainian].
- [7] J. J. R. Jegaraj, and N. R. Babu, "A strategy for efficient and quality cutting of materials with abrasive waterjets considering the variation in orifice and focusing nozzle diameter", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 12-13, pp. 1443-1450, 2005. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.01.020.
- [8] M. Monno, and C. Ravasio, "The effect of cutting head vibrations on the surfaces generated by waterjet cutting", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, iss. 3, pp. 355-363, 2005. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.07.010.
- [9] D. A. Axinte, D. S. Srinivasu, M. C. Kong, and P. W. Butler-Smith, "Abrasive waterjet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 49, iss. 10, pp. 797-803, 2009. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.04.003.
- [10] M. K. Kulekci, "Processes and apparatus developments in industrial waterjet applications", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 42, iss. 12, pp. 1297-1306, 2002. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/S0890-6955(02)00069-X.
- [11] J. Billingham, C. B. Miron, D. A. Axinte, and M. C. Kong, "Mathematical modelling of abrasive waterjet footprints for arbitrarily moving jets: Part II – Overlapped single and multiple straight paths", *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 68, pp. 30-39, 2013. ISSN 0890-6955.  
doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.003.
- [12] S. O. Subbotin, *Neural networks: theory and practice*. Zhytomyr, Ukraine: O. O. Evenok (Ed.), 2020 [in Ukrainian].
- [13] A. O. Oliynyk, S. O. Subbotin, and O. O. Oliynyk, *Intelligent data analysis*. Zaporizhzhia, Ukraine: ZNTU, 2012. ISBN 978-617-529-052-1 [in Ukrainian].
- [14] V. Ya. Galchenko, R. V. Trembovetska, and V. V. Tychkov, "Application of neurocomputing at the stage of building metamodels in the process of optimal surrogate synthesis of antennas", *Visnyk NTUU «KPI». Seriya: Radiotekhnika. Radioaparaturbuduvannia*, no. 74, pp. 60-72, 2018 [in Ukrainian].  
doi: 10.20535/RADAP.2018.74.60-72.

- [15] V. O. Horokhovatsky, and I. S. Tvoroshenko, *Methods of intellectual analysis and data processing*. Kharkiv, Ukraine: KHNURE, 2021 [in Ukrainian]. doi: 10.30837/978-966-659-298-2.
- [16] P. M. Pavlenko, S. F. Filonenko, O. M. Cherednikov, and V. V. Treytyak, *Mathematical modeling of systems and processes*. Kyiv, Ukraine: NAU, 2017. [in Ukrainian].

V. V. Khlivnyi,

e-mail: vitalik.xlywnij@gmail.com

C. V. Bazilo, Dr. Sc., Professor

Cherkasy State Technological University

Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

### INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS OF HYDROABRASIVE CUTTING OF VARIOUS MATERIALS ON THE ACCURACY OF OBSERVING THE CUTTING WIDTH

*This article considers the issue of building regression models to determine the influence of operating parameters of hydroabrasive cutting of various materials on the accuracy of observing the cutting width. Input parameters include the amount of abrasive feed, the amount of pressure of cutting fluid (water) and the viscosity of the processed material, and the output parameter is the cutting width. For more precise control of the cutting width, another initial parameter is taken into account - the cutting width at the exit from the material. This parameter of hydroabrasive cutting is important to achieve the desired accuracy and quality of cutting. A preliminary analysis of possible neural network architectures for building regression models has been performed using Neuro Solutions software. The MLPR-2-B-L neural network with the Levenberg-Marquardt learning method has been selected according to analysis results. The application of this model makes it possible to obtain weighting factors that have been used to predict the initial value of the cutting width at the input of the cutting jet to the processed material and at the exit of the cutting jet from the processed material based on the input parameters. An assessment of errors, adequacy and informativeness of regression models has been carried out. The use of histograms of residuals makes it possible to analyze the obtained results. In addition, a program in the MathCAD environment, which allows to analyze the obtained results and predict the cutting width based on the created regression model both at the input of the cutting jet into the processed material and at the exit from the material, has been developed. The obtained results determine the importance of the input parameters of hydroabrasive cutting and demonstrate the possibility of using them to predict the cutting width. This work is of practical importance for industrial enterprises that use hydroabrasive cutting, because accurate predictions of the cutting width allow to optimize the cutting process, ensuring high quality and efficiency and accuracy of work.*

**Keywords:** hydroabrasive cutting, cutting width, regression model, abrasive nozzle wear, process controllability, processing accuracy.

[0000-0002-2231-2529] **М. А. Мірошник<sup>1</sup>**, *д-р техн. наук, професор*,  
e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua

[0000-0003-1071-3445] **О. С. Шкіль<sup>2</sup>**, *канд. техн. наук, доцент*,  
e-mail: oleksandr.shkil@nure.ua

[0000-0002-6652-1840] **Д. Ю. Рахліс<sup>2</sup>**, *канд. техн. наук, доцент*,  
e-mail: dariia.rakhlis@nure.ua

[0009-0007-0799-6604] **К. Ю. Пшеничний<sup>2</sup>**, *аспірант*,  
e-mail: kyrylo.pshenychnyi@nure.ua

[0000-0001-5702-9611] **А. М. Мірошник<sup>2</sup>**, *асистент*,  
e-mail: anatolii.miroshnyk@nure.ua

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61000, Україна

<sup>2</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки  
просп. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна

## МОДЕЛЬ ОБРОБКИ ПОДІЙ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЇВ ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

*У статті проаналізовано питання моделювання пристроїв реального часу за допомогою шаблону кінцевих автоматів мовою опису апаратури. Проаналізовано класифікацію подій як моделей взаємодії кінцевого автомата з зовнішнім середовищем. Виокремлено новий вид подій та клас пристроїв, функціональність яких залежить від такого роду чинників. Показано, що такі події є поширеними у різних цифрових пристроях, приладах та системах реального часу. Запропоновано новий вид автоматного переходу для темпорального графа переходів як канонічної моделі при проектуванні цифрових систем. Розглянуті моделі проілюстровано за допомогою моделювання та аналізу часових діаграм. У роботі вирішено питання проектування часових керуючих автоматів у системах логічного управління реальним часом. Розглянуто питання систем управління з обробкою зовнішніх подій, які мають тривати визначений час.*

**Ключові слова:** цифрові пристрої, моделювання, моделі реального часу, сигнали, події, мовні моделі часових автоматів.

**Вступ.** Логічні системи управління представляють значний вузол будь-якої цифрової системи. Такі системи використовують двійковий алфавіт для визначення поведінки блока керування. Відомо, що шаблон кінцевого автомата (Finite State Machine) є поширеною моделлю для таких систем. Варто зауважити, що кінцевий автомат є математичною абстракцією, яка може бути представлена різними способами, наприклад, таблицею переходів станів, діаграмою станів (графом переходів), граф-схемою алгоритму (ГСА) тощо. При використанні автоматного шаблону важливо розуміти, що поведінка цільової системи залежить від подій, що відбуваються в зовнішньому середовищі, та використовується для моделювання переходу з одного стану FSM до іншого. В кінцевому автоматі події використовуються для моделювання певної зовнішньої дії, яка викликає перехід з одного стану в інший. До подій відносяться сигнали, викли-

ки, закінчення певного проміжку часу або зміна стану. Події можуть бути синхронними і асинхронними; їх вираження у кінцевій моделі – одна зі складових процесу проектування.

Моделювання пристроїв реального часу вимагає визначення поняття часу, в якому працюють модель та кінцеві пристрої. Цикли синхросигналу визначають машинний (автоматний) час, протягом якого функціонує автомат. Однак пристрої реального часу працюють у метричному часі. Інакше кажучи, стан таких пристроїв залежить як від вхідних сигналів, так і від часу, протягом якого ці сигнали обробляються. Таким чином, виникає вимога виразити метричний час у термінах автоматних тактів, оскільки переходи між станами автомата безпосередньо залежать від аспекту часу. З другого боку, необхідно виразити часові обмеження на графі переходів як початкової математичної моделі проектування.

В [1] показано, що будь-який цифровий пристрій можна представити у вигляді двох основних компонентів – операційного та керуючих автоматів. Така форма представлення операційного пристрою (ОП) базується на принципі мікропрограмного управління, який полягає у наступному:

– будь-яку операцію пристрою можна представити як послідовність елементарних логіко-арифметичних операцій за вхідними словами;

– логічні умови визначають порядок виконання цих операцій;

– представлення алгоритму в термінах мікрооперацій та логічних умов називається мікропрограмою;

– мікропрограма є формою представлення функціональності пристрою, на основі якої визначається структура і порядок функціонування пристрою в часі.

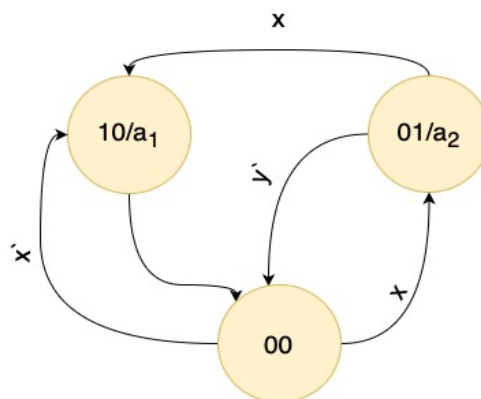
Операційний автомат (ОА) виконує зберігання слів інформації, виконання мікрооперацій алгоритму, виз над словами та обчислення значення логічних умов, які необхідні для виконання алгоритму. Операційний пристрій визначається такими дискретними множинами:  $Y = \{y_l, y_m\}$  визначає мікрооперації;  $X = \{x_l, x_h\}$  визначає логічні умови, які виникають під час виконання алгоритму;  $D = \{d_l, d_h\}$ , що поступають в автомат як операнди;  $R = \{r_l, r_g\}$ , що представляє результати операцій;  $S = \{s_l, s_n\}$  – внутрішні слова, які представляють інформацію в процесі виконання операцій.

На рисунку 1 показано структуру ОП як комбінацію операційної та керуючої частин і зв'язків між ними.



**Рисунок 1. Представлення цифрового операційного пристрою як комбінації операційного та керуючого автоматів**

Однією з канонічних форм представлення операційного та керуючих блоків є кінцевий автомат (Finite State Machine). Така форма представлення пристрою дозволяє синтезувати дискретні схеми без урахування часових параметрів і конкретних фізичних елементів, з яких ці схеми побудовані. На рисунку 2 наведено приклад графа переходів кінцевого автомата Мура.



**Рисунок 2. Граф переходів кінцевого автомата Мура**

У цьому графі дуги означають переходи між станами та умови, за яких вони відбуваються; вершини – стани та вихідні сигнали, які видає автомат при перебуванні у цьому стані. Зокрема в [2] визначено роль і місце керуючих автоматів у системах логічного управління. Подана методика проектування автоматичних систем логічного управління з урахуванням реального часу і обробки зовнішніх подій. Наведена класифікація зовнішніх подій і способи їх обробки.

Концепція автомата реального часу – це спосіб опису технічних систем реального часу [3, 4]. Графова модель автомата доповнюється скінченною множиною таймерів, які приймають значення натуральних величин. Як і в класичному графі, вершини називаються станами, дуги – переходами. Кожний таймер скидається в нуль у момент переходу і збільшує своє значення з кожним автоматним тактом. З кожним переходом пов'язане часове обмеження (clock constraint), яке означає, що цей перехід може бути здійснений лише в тому випадку, якщо поточні значення таймера задовольняють це обмеження. З кожною позицією пов'язане обмеження на таймери – інваріанти; система може перебувати в цій позиції доти, доки виконується її інваріант.

У [5] введено нову класифікацію моделей кінцевих автоматів залежно від реалізації переходів та вихідних сигналів. Всі автомати розділено на три класи. У автоматів першої категорії (регулярні, regular) переходи залежать виключно від вхідних сигналів, а значення вихідних сигналів – тільки від станів та вхідних сигналів. Це класичні автомати Мілі та Мура. У автоматів другої категорії (часові, timed) переходи залежать від вхідних сигналів та часу їх прояву; вихідні сигнали – тільки від станів. Переходи автоматів третьої категорії (рекурсивні, recursive) залежать від вхідних сигналів та часу їхньої появи, а вихідні – від теперішнього стану та попереднього, тобто для вихідних сигналів  $y_i$  у стані  $a_i$  реалізується функція  $y_i = y_i + y_j$ , де  $a_j$  попередній стан автомата.

В [6] розглянуто узагальнену модель часового автомата з таймаутами, часовими обмеженнями та вихідними затримками. Узагальнено модель структурного темпорального керуючого автомата  $Y(t) = g(X(t), Z(t), T)$ ,  $Z(t+1) = f(X(t), Z(t), T)$ , де  $X$  – множина вхідних сигналів,  $Z$  – множина внутрішніх змінних, яка визначає стан автомата,  $Y$  – множина вихідних сигналів,  $t$  – машинний час, що визначається в автоматичних тактах,  $d$  – функція виходів і  $f$  – функція переходів структурного автомата.  $T = \{t_c, t_o, t_d\}$  є множиною часових параметрів автомата, де:  $t_c$  – часові обмеження,  $t_o$  – вхідні таймаути,  $t_d$  – вихідні затримки.

Способи опису моделей кінцевих автоматів мовами опису апаратури на основі автоматних шаблонів розглянуто в [7, 8], а в [9, 10] розглянуто проблеми опису та мінімізації моделей часових подієвих автоматів. В [11] розглядаються питання знаходження та аналізу довжини встановлюючих послідовностей для часових автоматів. Моделі параметричних часових автоматів з умовною довжиною вхідних сигналів та інваріантів розглядаються в [12]. В [13] запропоновано спосіб моделювання зовнішніх та внутрішніх дискретних подій з використанням автоматних моделей.

У [14] запропоновано класифікацію керуючих автоматів за способом отримання вихідних сигналів на моделі Мілі та Мура, за способом опрацювання вхідних сигналів на пасивні та активні. Також запропоновано класифікувати події згідно зі способом опрацювання на ініціюючі та перериваючі.

Варто відзначити, що в усіх розглянутих роботах не розглядаються події довжиною більше одного автоматного такту. Проте в технічних системах реального часу виникає задача розгляду моделей часових подієвих автоматів, які обробляють події з невизначеною довжиною. Для спрощення викладення приймемо, що  $t_c = t_o$ , тобто подія «приймається» та обробляється протягом усього часу знаходження автомата у відповідному стані.

**Мета та задачі дослідження.** Метою статті є розробка моделей нового класу подій з невизначеною тривалістю для моделювання пристроїв логічного керування реального часу, наданих мовами опису апаратури.

Задачами дослідження є:

- визначення класу пристроїв, в яких зовнішні події мають тривати певний час для впливу на систему;
- формулювання способів вираження такого роду подій на графі переходів;
- формування теоретичного підґрунтя для моделювання нового класу пристроїв;
- моделювання можливих сценаріїв обробки подій мовами опису апаратури.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого проектування цифрових пристроїв логічного керування реального часу. Предметом дослідження є моделі подій та способи їх обробки в автоматних пристроях керування реального часу, представлених мовами опису апаратури.

**Виклад основного матеріалу.** Візуальним описом моделі часового автомата є темпоральний граф переходів. Такий граф розширюється таймером, який використовується для затримок у станах. Таймер використовується для перебування у стані впродовж певної кількості тактів синхросигнала. На рисунку 3 наведено приклад автомата з часовими переходами.

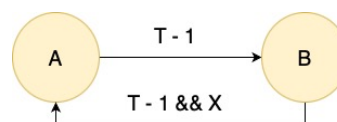


Рисунок 3. Приклад темпорального графа переходів

Перехід між станами  $A$  та  $B$  – це звичайний часовий перехід, при якому автомат залишається в стані  $A$  протягом  $T$  циклів син-

хросигнала. Умова написана у формі  $T - 1$ , оскільки внутрішній таймер прийматиме значення від 0 до  $t = T - 1$ . Перехід  $BA$  залежить від стану допоміжного таймера і вхідного сигналу  $X$ . Таким чином, автомат перебуватиме у стані  $B$  принаймні протягом  $T - 1$  тактів. Такий тип переходів називається умовно-часовим.

На рисунку 4 детально описані як часові, так і умовні переходи для автомата з рисунка 2 з використанням явного значення таймера в описі умов.

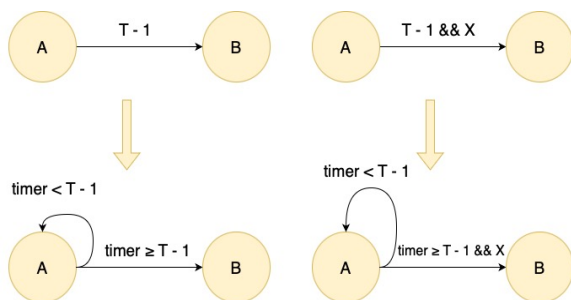


Рисунок 4. Приклади опису темпоральних переходів

Як було зазначено вище, існує клас пристроїв, які реагують на зовнішні події, подовжені у часі. Для таких пристроїв є важливими часові характеристики зовнішньої події. Наприклад, затискання кнопки вимикає пристрій; при зберіганні певного рівня температури у приміщенні впродовж 30 хв має увімкнутися система охолодження; якщо оператор не реагує на помилки у системі впродовж 5 хв, система має увійти в аварійний стан. Цей клас пристроїв вимагає відображення в існуючих моделях на базі кінцевих автоматів.

Визначимо, що часові обмеження події – це значення  $t_c(X(i)) = [c1]$ , що позначає мінімальний час тривалості певного вхідного сигналу події. У прикладі з кнопкою блокування мобільного телефона  $t_c = 3$  с (для спрощення викладення це значення наведено у секундах). Зазначене обмеження виразимо на темпоральному графі у вигляді переходу. В умові цього переходу необхідно враховувати значення таймера зі значенням  $t_c(X(i))$ .

На рисунку 5 наведено приклад такого переходу. Як і у випадку темпорального переходу, в умові береться до уваги стан таймера. Головною відмінністю є те, що таймер тепер має нижню границю, тобто для успішної зміни стану  $a_2/a_3$  необхідно, аби сигнал події  $evnt$

був активним (приймав значення високого рівня, тобто '1') і таймер був більшим за значення  $t_c(evnt)$ . Введемо два логічні підстани стану  $a_2$ :  $a_2/reset$  та  $a_2/inc$ . У разі, якщо сигнал  $evnt$  приймає значення високого рівня, але значення таймера менше за  $t_c(evnt)$ , то автомат переходить у підстан  $a_2/inc$ . У цьому стані таймер інкрементує внутрішній стан. Якщо сигнал  $evnt$  приймає значення низького рівня ('0') та значення таймера менше за  $t_c(evnt)$  – автомат опиняється у підстані  $a_2/reset$ , в якому таймер скидається у 0. Важливо зауважити, що необхідно мати стан, перехід в який не буде залежати від таймера. Це є важливим для уникнення циклів. У цьому прикладі таким станом є  $a_1$ , в який автомат переходить при високому рівні сигналу скидання  $rst$ .

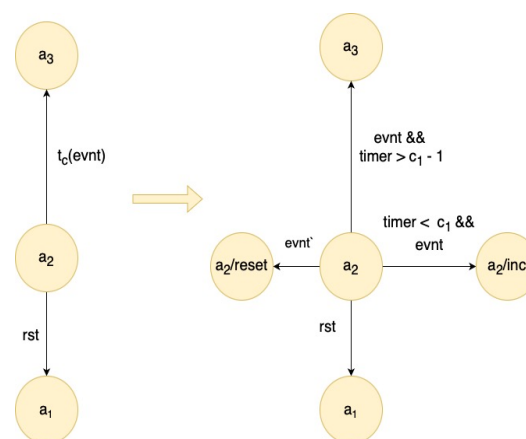


Рисунок 5. Приклад темпорального графа переходів з подією

Залежно від природи зовнішньої події, можуть бути чотири можливі типи поведінки, які задовольняють або порушують часову вимогу. Для подальшого викладення приймемо, що сигнал  $evnt$  має зберігати високий логічний рівень впродовж мінімум 4 тактів сигналу  $Clk$ . Перший сценарій – це коли зовнішня подія триває рівно необхідний час. У цьому випадку автомат переходить у наступний стан і внутрішній лічильник скидається. На рисунку 6 показано часову діаграму – сигнал  $evnt$  зберігає високе значення впродовж 4 тактів синхросигналу  $Clk$  (мінімально необхідна тривалість для зміни станів), після чого автомат переходить у новий стан  $a_3$ . Червоним пунктиром позначено початок та кінець обрахування події внутрішнім таймером.

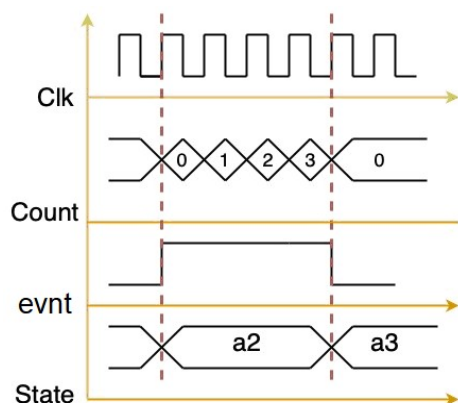


Рисунок 6. Часова діаграма темпорального переходу з подією, яка триває рівно необхідну кількість тактів

Другий випадок відповідає ситуації, коли подія триває більше, ніж  $t_o$  відповідного стану. Варто відзначити, що для класу пристроїв, описаних у вступі, більша тривалість події не є критичною, оскільки виконується умова мінімальної тривалості події. Як і в попередньому випадку, автомат перейде в наступний стан зі скиданням лічильника. Рисунок 7 містить часову діаграму такого випадку.

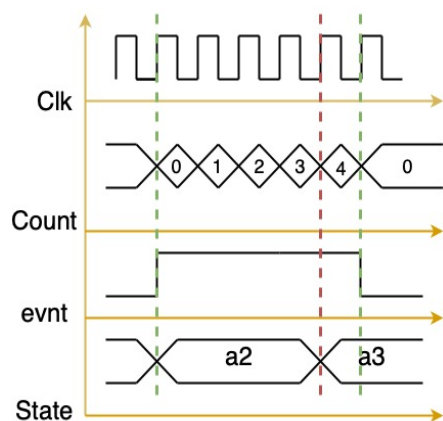


Рисунок 7. Часова діаграма з подією, тривалістю більше, ніж необхідно

Як видно з діаграми, сигнал *evnt* зберігає високе значення впродовж 5 тактів, що є на 1 такт більше від необхідного значення. Як і в минулому випадку, автомат перейде у новий стан та перезапустить таймер. Зеленим пунктиром виділено відрізок, на якому сигнал *evnt* має позитивне значення, червоним – момент зміни стану автомата.

Третій випадок описує ситуацію, коли подія триває менше зазначеного часу. У цьому випадку автомат залишається в тому самому стані зі скиданням лічильника, як показано на рисунку 8. Скидання лічильника у

цьому випадку є важливою операцією, оскільки таймер має бути готовий до обробки наступних потенційних подій.

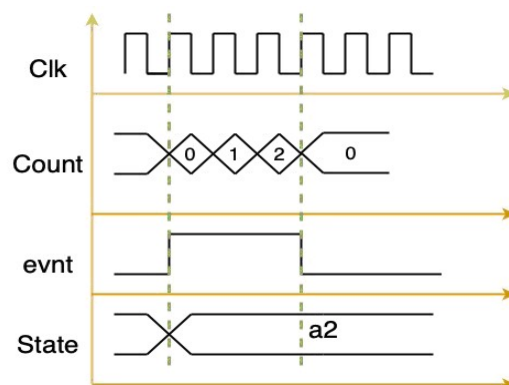


Рисунок 8. Часова діаграма з подією, тривалістю менше, ніж необхідно

Важливим є питання тупика, в який може потрапити автомат, якщо зовнішня подія не триває необхідний час або не відбувається взагалі. Для такого випадку автомат повинен мати сигнал скидання, який переводив би пристрій у наперед заданий стан. Як правило, для цього інтерфейс цифрового пристрою має сигнал скидання. Важливо відзначити, що цей сигнал має вищий пріоритет, ніж інші вхідні сигнали. Це є важливим під час написання безпосередньо апаратної реалізації пристрою за допомогою мов опису апаратури, таких як VHDL, Verilog, SystemVerilog. Рисунок 9 містить часову діаграму, яка описує цю ситуацію – сигнал *evnt* зберігає (приймає) високий рівень одночасно з сигналом *rst*, однак автомат переходить у стан  $a_1$ , оскільки сигнал *rst* має більший пріоритет.

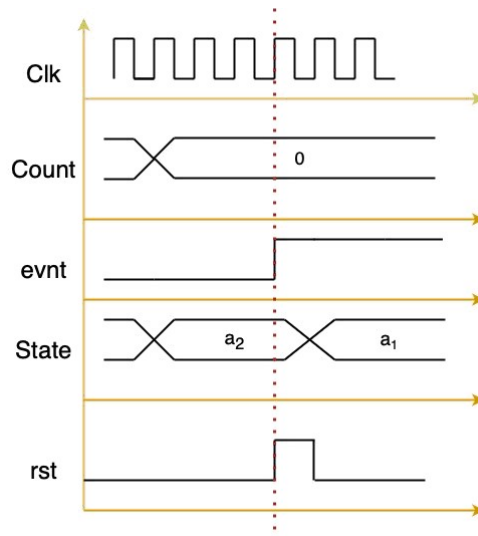


Рисунок 9. Часова діаграма темпорального переходу при асинхронному скиданні

**Результати дослідження.** Розділення пристроїв на операційний та керуючий автомати є найпоширенішою формою проектування цифрових пристроїв. Ця форма візуально виражає внутрішню природу пристрою на високому рівні абстракції. На базі графа переходів команда проектувальників описує пристрій за допомогою мови опису апаратури, використовуючи концепцію автоматного шаблону.

Темпоральний граф переходів є відправною точкою при проектуванні керуючої частини пристроїв реального часу. Така модель графа розширюється дискретною множиною таймерів, які використовуються для опису затримок у станах. Обробка подій в такого роду моделях теж має свої особливості.

Запропоновано новий клас пристроїв, у яких тривалість зовнішніх подій має задовольняти часовим умовам, аби система на них реагувала. Ці обмеження необхідно враховувати при проектуванні кінцевого керуючого автомата, а відповідно, і відображати на темпоральному графі переходів. У роботі запропоновано новий вид переходу, який враховує не тільки зовнішню подію, але й її тривалість. Технічно це реалізується за допомогою додаткового таймера.

Для запропонованої моделі розглянуто різні випадки тривалості події та відповідні сценарії реакції автомата на них:

- зовнішня подія триває рівно стільки часу, скільки вказано у специфікації;
- зовнішня подія триває менше необхідного часу;
- зовнішня подія триває більше необхідного часу;
- зовнішня подія не відбувається.

Усі можливі сценарії проілюстровано відповідними часовими діаграмами з детальними поясненнями та кодом мовою опису апаратури. На рисунку 10 наведено опис фрагменту моделі керуючого пристрою мовою опису апаратури (в цьому випадку використано Verilog, підмножина, що синтезується), який ілюструє часову діаграму на рисунку 9.

Сигнал *rst\_n* (скидання) обробляється перед рештою сигналів, тобто має найвищий пріоритет. Цей фрагмент виділено червоним пунктиром, обробку інших сигналів (логіку зміни станів) – зеленим.

```
always @(posedge clk, posedge rst_n)
  if (rst_n) begin
    state <= A;
    timer <= 3'd0;
  end
  else begin
    state <= next_state;
    timer <= next_timer;
  end

always @(state, timer, x) begin
  next_state = state;
  next_timer = 3'd0;
  case (state)
    A: if (timer >= Tmax) begin
        next_timer = 3'd0;
        next_state = B;
      end
    else begin
        next_state = A;
        next_timer = timer + 1'b1;
      end
    B: next_state = C;
    C: if (timer >= Tmax && x) begin
        next_state = A;
        next_timer = 3'd0;
      end
    else begin
        next_state = B;
        next_timer = timer + 1'b1;
      end
    default: begin
        next_state = A;
        next_timer = 3'd0;
      end
  endcase
end
```

Рисунок 10. Приклад автоматного опису мовою Verilog з обробкою подій

**Обговорення результатів.** Серед сучасних технічних систем логічного управління та зв'язку все більшу роль відіграють пристрої з сенсорними панелями керування. Для таких пристроїв суттєвий вплив має не тільки наявність керуючих подій, але і їх тривалість. З другого боку, людина, задаючи керуючу подію (натискаючи на сенсорну панель), не має можливості точно регулювати тривалість сенсорного контакту (події). Виходячи з цього, пристрій керування (керуючий автомат) повинен мати змогу коректно реагувати на керуючі зовнішні події невизначеної тривалості. В роботі розглянуто різні співвідношення тривалості подій та станів керуючого часового автомата. Запропоновано способи обробки зовнішніх подій у системах логічного управління реальним часом, реалізовані в моделях мовами опису апаратури, що дозволяє використовувати зазначені процедури в системах автоматизованого проектування керуючих пристроїв на основі систем програмованої логіки.

**Висновки.** У роботі розглянуто питання проектування пристроїв реального часу на базі графів переходів керуючих автоматів. Детально розглянуто новий клас пристроїв реального часу – пристрої, які функціонують

на базі подій з певною тривалістю у часі. Такий рід подій було запропоновано відображати на темпоральному графі переходів. Детально розглянуто можливі реакції автомата залежно від тривалості події.

Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні темпорального графа переходів як основної моделі візуального відображення пристроїв логічного керування реального часу, що дозволило значно розширити клас подієвих пристроїв логічного керування, які можуть бути представлені автоматними моделями.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- виокремлено новий клас пристроїв логічного керування реального часу, що враховують наявність зовнішніх подій, і відповідний спосіб їхнього представлення мовами опису апаратури та моделювання на базі кінцевого автомата;

- на прикладах показано можливість використання запропонованої моделі подій при різних співвідношеннях тривалості подій та часу знаходження керуючого часового автомата у відповідному стані.

Запропоновані моделі є теоретичною базою для удосконалення процесу автоматизованого проектування керуючих автоматів за допомогою мов опису апаратури з використанням автоматного шаблону.

Напрямок подальших досліджень може бути використання отриманих результатів у розробці систем діагностики подієвих систем реального часу [15].

#### Список використаних джерел / References

- [1] S. Baranov, *Logic and System Design of Digital Systems*. Tallinn: TUT Press, 2008.
- [2] A. A. Shalyto, "Software automation design: Algorithmization and programming of problems of logical control", *Journal of Computer and System Sciences International*, vol. 39, no. 6, pp. 899-916, 2000.
- [3] R. A. Alur, and D. L. Dill, "Theory of timed automata", *Theoretical Computer Science*, vol. 126, no. 2, pp. 183-235, 1994.
- [4] M. Zhigulin, N. Yevtushenko, S. Maag and A. Cavalli, "FSM-based test derivation strategies for systems with time-outs", in *2011 11th Int. Conf. Qual. Softw. (QSIC)*, Madrid, Spain, July, 13-14, 2011. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/qsic.2011.30>. Accessed on: March 29, 2023.
- [5] V. A. Pedroni, *Finite State Machines in Hardware: Theory and Design (with VHDL and SystemVerilog)*. MA: MIT Press Cambridge, 2013.
- [6] M. Miroshnyk et al., "Design of real-time system logic control on FPGA", in *2019 IEEE East-West Des. Test Symp. (EWDTS)*, Batumi, Georgia, Sept. 13-16, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ewdts.2019.8884387>. Accessed on: March 29, 2023.
- [7] A. S. Klimowicz, and V. V. Solov'ev, "Structural models of finite-state machines for their implementation on programmable logic devices and systems on chip", *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, vol. 54, no. 2, pp. 230-242, March 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1134/s1064230715010074>. Accessed on: March 29, 2023.
- [8] M. A. Miroshnyk, A. S. Shkil, E. N. Kulak, D. Y. Rakhlis, A. M. Miroshnyk, and N. V. Malahov, "Design timed FSM with VHDL Moore pattern", *Radio Electronics, Comput. Science, Control*, no. 2, pp. 137-148, Sept. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-14>. Accessed on: March 29, 2023.
- [9] D. Bresolin, A. Tvardovskii, N. Yevtushenko, T. Villa, M. Gromov, "Minimizing deterministic timed finite state machines", in *14th IFAC Workshop on Discrete Event Systems WODES 2018*, IFAC-PapersOnLine, vol. 51, issue 7, pp. 486-492, 2018.
- [10] D. Bresolin, K. El-Fakih, T. Villa, and N. Yevtushenko, "Equivalence checking and intersection of deterministic timed finite state machines", *Formal Methods in System Design*, no. 7, pp. 1-26, 2022.
- [11] A. S. Tvardovskii, and N. V. Yevtushenko, "Deriving homing sequences for finite state machines with timed guard", *Automatic Control and Computer Sciences*, vol. 55, no. 7, pp. 738-750, 2021.
- [12] E. André, D. Lime, and M. Ramparison, "TCTL model checking lower/upper-bound parametric timed automata without invariants", in *Proc. Int. Conf. Formal Modeling and Analysis of Timed Systems FORMATS 2018*, Sept. 4-6, Bieijing, China, 2018, pp. 37-52.
- [13] G. Wagner, "An abstract state machine semantics for discrete event simulation", in *Proc. 2017 Winter Simulation Conf. (WSC)*, Dec. 3-6, 2017, Las Vegas, USA. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8247830>. Accessed on: March 29, 2023.

- [14] M. Miroschnyk, A. Shkil, E. Kulak, D. Rakhlis, I. Filippenko, and M. Malakhov, "Hardware implementation of timed logical control FSM", *Proc. 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'20)*, Sept. 4-7, Varna, Bulgaria, 2020. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9225129>. Accessed on: March 29, 2023.
- [15] Lamperti, and M. Zanella, *Diagnosis of Active Systems: Principles and Techniques (The Springer International Series in Engineering and Computer Science)*. Springer, 2003.

**M. A. Miroschnyk<sup>1</sup>**, Dr. Tech. Sc., Professor,  
e-mail: [m.miroschnyk@karazin.ua](mailto:m.miroschnyk@karazin.ua)

**O. S. Shkil<sup>2</sup>**, Ph. D., Associate Professor,  
e-mail: [oleksandr.shkil@nure.ua](mailto:oleksandr.shkil@nure.ua)

**D. Yu. Rakhlis<sup>2</sup>**, Ph. D., Associate Professor,  
e-mail: [dariia.rakhlis@nure.ua](mailto:dariia.rakhlis@nure.ua)

**K. Yu. Pshenychnyi<sup>2</sup>**, Ph. D. Student,  
e-mail: [kyrylo.pshenychnyi@nure.ua](mailto:kyrylo.pshenychnyi@nure.ua)

**A. M. Miroschnyk<sup>2</sup>**, Assistant,  
e-mail: [anatolii.miroschnyk@nure.ua](mailto:anatolii.miroschnyk@nure.ua)

<sup>1</sup>Kharkiv National University named after V. N. Karazin  
Svobody Maidan, 4, Kharkiv, 61000, Ukraine

<sup>2</sup>Kharkiv National University of Radioelectronics  
Nauky Ave. 14, Kharkiv, 61166, Ukraine

## EVENT PROCESSING MODEL FOR SIMULATION OF REAL-TIME LOGIC CONTROL DEVICES

*Among modern technical systems, logical control and communication devices with touch control panels play an increasingly important role. In such devices the duration of controlling events is important. On the other hand, a person cannot exactly control the durability of the event when pressing and holding a panel. Based on this, a control device (control unit) must properly respond to external events of unknown durability. Thus, when designing a real-time system, it's required to express metric time in terms of the automation clock because the transitions between the automata states directly depend on the metric time aspect.*

*The purpose of this article is to introduce a new events class used in real-time device simulation – the events with minimal duration. The object of research is real-time device control algorithms. The subject of research is event-based automatic models described by the hardware description languages.*

*The article analyzes the issue of simulation real-time devices using the state machine template in hardware description languages. The classification of events as finite state machine interaction with the external environment models is analyzed. A new type of event and a class of devices whose functionality depends on such factors are introduced. It is shown that such events are widespread in various digital devices and real-time systems. A new type of FSM transition is proposed for the temporal state diagram as digital systems design canonical model. The considered models are illustrated by simulations and timing diagrams analysis.*

*For the proposed model, different cases of the duration of the event have been considered and the corresponding processes of the machine's reaction to them are as follows: the external event lasts exactly as long as required in the specification; the external event lasts less than required; the external event lasts longer than required; no external event occurs. All possible processes are illustrated with timing diagrams with detailed explanations and hardware description language code examples. A description of the device model fragment using the Verilog synthesizable subset is given.*

**Keywords:** digital devices, simulation, real-time models, signals, events, language models of timed finite state machines.

[0000-0002-6307-925X] **А. І. Санжаровський**, *магістр*,  
e-mail: anatsanzh@gmail.com

[0000-0001-7550-9213] **В. Я. Юрчишин**, *канд. техн. наук, доцент*  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

## МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ФЕЙКОВИХ НОВИН НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Об'єктом дослідження є процес аналізу інформації в соціальних медіа для виявлення фейкових новин. Предметом дослідження є розроблення програмного забезпечення алгоритмічно-програмного методу для виявлення фейкових новин. Мета роботи полягає у підвищенні середньої точності процесу виявлення фейкових новин у соціальних медіа шляхом розробки та реалізації алгоритмічно-програмного методу виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання. Використано різноманітні методи наукових досліджень: аналізу – для з'ясування переваг та недоліків існуючих методів виявлення фейкових новин; порівняння – при виборі найбільш оптимальної мови програмування та середовища програмування для розробки програмного забезпечення для виявлення фейкових новин; метод огляду актуальної літератури з виявлення фейкових новин, включаючи академічні публікації, технічні звіти та онлайн-ресурси; метод експертної оцінки, за допомогою якого було отримано інформацію щодо ефективності різних методів виявлення фейкових новин. Завдяки використанню цих методів було отримано комплексне розуміння проблеми виявлення фейкових новин та розроблено ефективне програмне забезпечення для виявлення фейкових новин. Наукова новизна роботи полягає в тому, що було запропоновано модифікований алгоритмічно-програмний метод виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання, який відрізняється від наявних методів використанням ансамблю з трьох алгоритмів, результати кожного з яких використовуються для вибору компактніших спеціалізованих моделей для наступних алгоритмів, що в підсумку дозволяє пришвидшити процес виявлення фейкових новин у тексті на 30 %, порівнюючи з аналогами, а також зменшити середню хибність на 25 %. Практична цінність отриманих у роботі результатів полягає в тому, що розроблене програмне забезпечення алгоритмічно-програмного методу для виявлення фейкових новин сприятиме зменшенню поширення фейків та допомогатиме їх виявленню.

**Ключові слова:** алгоритмічно-програмний метод, алгоритми машинного навчання, методи виявлення та розпізнавання фейків, BERT, LSTM, Passive-Aggressive Classifier.

**Вступ.** Стрімке поширення інформації в соціальних медіа призводить до того, що фейкові новини стали однією з найбільших проблем у сучасному цифровому світі, зокрема вони використовуються як інструмент інформаційної війни [1]. Найбільш поширеними є підробка чи фабрикація новин, яка полягає в маніпулятивному спотворенні фактів, свідомій дезінформації. Більшість цих фейків створюються і поширюються в соціальних медіа без перевірки на відповідність та розраховані на людей, які сприймають інформацію емоційно без належного аналізу на відповідність. Це зумовлено тим, що емоційне сприйняття, особливо негативного характеру, унеможливорює критичний аналіз, а також

сприяє подальшому поширенню фейкової інформації. Дослідження [2], опубліковане в Science у 2018 р., показало, що фейкові новини в Twitter на 70 % частіше ретвітять, а також вони швидше поширюються і охоплюють більше людей, ніж правдиві історії.

Згідно зі звітом Глобального індексу дезінформації [3] глобальні витрати на онлайн-дезінформацію можуть досягати 78 млрд дол. на рік, причому найбільше постраждає бізнес. У звіті підраховано, що підприємства втрачають у середньому 3,6 % свого річного доходу через кампанії з дезінформації.

Дослідження [4], проведене вченими з Університету Уоріка та Каліфорнійського університету в Сан-Дієго, показало, що вплив

фейкових новин під час президентських виборів у США 2016 р. міг вплинути на результат. Дослідження підрахувало, що фейкові новини, можливо, переконали 4,4 % населення переключити свій голос з Гіллари Клінтон на Дональда Трампа, чого було достатньо, щоб розгойдати вибори на користь Трампа.

Фейкові новини також мали значний вплив щодо України, особливо після анексії Криму Росією в 2014 р. Російські державні ЗМІ та інші джерела були звинувачені в поширенні дезінформації та пропаганди з метою створення неправдивого наративу про конфлікт і підризу довіри до українського уряду. Одним із найбільш показових прикладів впливу фейкових новин на війну в Україні стало збиття літака рейсу МН17 Малайзійських авіаліній у липні 2014 р. Незабаром після того, як літак був збитий, російські державні ЗМІ та інші джерела почали поширювати численні неправдиві наративи про інцидент, включаючи твердження про те, що літак збили українські військові літаки. Ці заяви пізніше були спростовані розслідуваннями, які дійшли висновку, що підтримувані Росією сепаратисти несуть відповідальність за напад.

Вплив фейкових новин на війну в Україні є значним, а неправдиві наративи сприяють поширенню дезінформації, загостренню напруженості та подальшій дестабілізації в країні.

Наразі зростає кількість досліджень, спрямованих на виявлення такого типу інформації та вироблення запобіжників щодо її подальшого поширення. Однак переважна більшість таких досліджень стикається з низкою проблем під час ідентифікації фейкових новин у соціальних мережах. До найбільш поширених із них можна віднести: складність збирання та визначення «вручну» належності до фейкової новини; неефективність блокування в месенджерах (Facebook, WhatsApp, Twitter та інших) можливості поширення фейкової інформації та скарг на неї; поширення дезінформації верифікованими новинними агентствами або друзями чи родичами.

Автоматизовані методи виявлення фейкових новин можуть допомогти відфільтрувати неправдиву інформацію, що сприятиме зменшенню впливу фейкових новин на окремих осіб, організації та уряди. Ці методи також сприяють забезпеченню відповідними засобами для позначення та видалення фейкових новин із платформ соціальних мереж,

пошукових систем та інших онлайн-каналів. Серед найбільш цікавих досліджень можна виокремити наступні:

1. «Виявлення фейкових новин у соціальних мережах: перспектива інтелектуального аналізу даних» (2017) [5] за авторством Kai Shu, Amy Sliva, Suhang Wang, Jiliang Tang, Huan Liu, в якому розглядається можливість виявлення фейкових новин у соціальних мережах за допомогою поєднання алгоритмів машинного навчання та методів інженерії функцій. Автори взяли за основу аналізу набір даних твітів, пов'язаних з президентськими виборами в США 2016 р., та з високою точністю виявили фейкові новини.

2. «Боротьба з фейковими новинами: опитування щодо методів ідентифікації та пом'якшення наслідків» (2019) за участю Karishma Sharma, Feng Qian, He Jiang, Natali Ruchansky, Ming Zhang, Yan Liu [6], в якому здійснено огляд різних методів виявлення та пом'якшення фейкових новин, включаючи перевірку фактів, алгоритми машинного навчання та аналіз соціальних мереж.

3. «Лінгвістичні особливості фейкових новин та їх наслідки для автоматизованого виявлення» Хорна та Адалі (2017) [7], в якому аналізуються лінгвістичні особливості фейкових новин та визначається кілька характеристик, які можна використовувати для розрізнення справжніх та фейкових новин.

Наведені дослідження являють собою низку найбільш поширених підходів до виявлення фейкових новин, включаючи алгоритми машинного навчання, лінгвістичний аналіз та аналіз соціальних мереж. Вони підкреслюють важливість міждисциплінарних досліджень у цій сфері та припускають, що комбінація підходів може бути найбільш ефективною у виявленні фейкових новин.

Саме тому наше дослідження присвячено розробленню програмного забезпечення (ПЗ) модифікованого методу для виявлення фейкових новин, яке сприятиме зменшенню поширення фейків і допомогатиме їх виявляти. Об'єктом дослідження є процес аналізу інформації в соціальних медіа для виявлення фейкових новин. Предметом дослідження є розроблення ПЗ модифікованого методу для виявлення фейкових новин. Під час проведення дослідження були використані різноманітні методи наукових досліджень: аналізу – для з'ясування переваг та недоліків існуючих методів виявлення фейкових новин;

порівняння – при виборі найбільш оптимальної мови програмування та середовища програмування для розробки ПЗ для виявлення фейкових новин. Також було застосовано метод огляду наявної актуальної літератури з виявлення фейкових новин, включаючи академічні публікації, технічні звіти та онлайн-ресурси. Метод експертної оцінки було використано для пошуку інформації від експертів у галузі виявлення фейкових новин. Завдяки використанню цих методів було отримано комплексне розуміння проблеми виявлення фейкових новин та розроблено ефективне ПЗ для виявлення фейкових новин.

**Мета та задачі дослідження.** Мета дослідження полягає в підвищенні середньої точності процесу виявлення фейкових новин у соціальних медіа шляхом розробки та реалізації алгоритмічно-програмного методу виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання. Для досягнення мети виконані такі завдання: досліджено існуючі методи виявлення фейкових новин; виявлено переваги та недоліки використання наявних методів; розроблено програмний модуль для тестування ефективності алгоритмів наявних методів та сформованих наукових гіпотез; запропоновано новий модифікований метод виявлення фейкових новин зі збільшеною точністю, порівнюючи з існуючими методами; створено ПЗ, яке реалізує запропонований метод; експериментально досліджено ефективність розробленого методу шляхом оцінки якості роботи ПЗ за встановленими критеріями.

#### **Виклад основного матеріалу**

**Аналіз наявних аналогів.** Існує кілька програмних методів виявлення фейкових новин, кожен зі своїми перевагами та обмеженнями, а саме:

*Обробка природної мови* (НЛП) [8] – це техніка, яка використовує алгоритми машинного навчання для аналізу тексту новинних статей і виявлення закономірностей та особливостей, які вказують на ймовірність того, що стаття буде підробленою. Цей метод може бути ефективним, але він вимагає великої кількості навчальних даних і може погано працювати з нетекстовим вмістом, таким як зображення та відео.

*Метод аналізу джерел* передбачає аналіз достовірності джерела новинної статті. Це можна зробити, дослідивши репутацію новинного видання чи журналіста, точність

їхніх попередніх репортажів та будь-які упередження, які вони можуть мати. Хоча цей метод може бути корисним, він може бути неефективним для виявлення більш тонких форм упередженості або маніпуляцій.

*Перевірка фактів* включає перевірку точності тверджень, зроблених у новинній статті, на відповідність бази даних перевірених фактів. Це може бути ефективним для виявлення відвертої брехні, але може бути не в змозі виявити більш тонкі форми дезінформації або пропаганди.

*Метод аналізу соціальних мереж* передбачає аналіз соціальної мережі, в якій поширюється новина. Досліджуючи користувачів, які діляться статтею, та їхні зв'язки з іншими користувачами, можна виявити моделі скоординованої пропаганди чи маніпуляції. Однак цей метод може бути неефективним для виявлення більш поодиноких випадків фейкових новин.

Загалом кожен із цих методів має свої сильні та слабкі сторони, а поєднання кількох методів може бути найбільш ефективним для виявлення фейкових новин.

*Двосторонні рекурентні нейронні мережі LSTM (Long Short-Time Memory) (RNN)* успішно використовуються для виявлення фейкових новин [9; 10; 11]. Цей підхід передбачає навчання нейронної мережі на великому наборі даних новинних статей, де кожна стаття позначається або як «справжня», або як «фейкова». Нейромережа вчиться виявляти закономірності в тексті, які пов'язані або з реальними, або з фейковими новинами, а потім може бути використана для класифікації нових статей як справжніх або фейкових.

Перевага використання двосторонньої LSTM-RNN полягає в тому, що вона може враховувати як прямий, так і зворотний контекст кожного слова в тексті, дозволяючи йому фіксувати більш складні відносини між словами та фразами. Крім того, LSTM здатні «запам'ятовувати» інформацію протягом більш тривалих періодів часу, що може бути корисно для виявлення тонких шаблонів у тексті.

Хоча двосторонні LSTM-RNN показали перспективність у виявленні фейкових новин, вони не позбавлені обмежень. Наприклад, їм може бути важко виявити більш тонкі форми маніпуляції або пропаганди, які не покладаються на очевидні фактичні неточності. Крім

того, точність моделі сильно залежить від якості та розміру навчального набору даних і може змінюватися залежно від конкретних джерел новин і тем, що аналізуються.

*Двосторонні представлення кодувальників на основі перетворювачів (BERT) (Bidirectional Encoder Representations from Transformers)* [12; 13] – це попередньо навчена мовна модель, розроблена Google, яка ефективна в широкому спектрі завдань обробки природної мови, включаючи виявлення фейкових новин.

BERT показав свою ефективність у виявленні фейкових новин, оскільки він може вловлювати тонкі нюанси мови, які часто використовуються у фейкових новинах для маніпулювання або введення читачів в оману. Однак, як і в інших моделях машинного навчання, його точність сильно залежить від якості та розміру навчального набору даних, і йому може бути важко виявити більш складні форми пропаганди або дезінформації. Крім того, обчислювальні витрати на точне налаштування BERT можуть бути досить високими, що ускладнює масштабування моделі до більших наборів даних або додатків у реальному часі.

*Пасивно-агресивний класифікатор (Passive-Aggressive Classifier) (PA)* [14] – алгоритм є одним із популярних лінійних класифікаторів, який використовувався для виявлення фейкових новин. Перевага використання алгоритму PA для виявлення фейкових новин полягає в тому, що він відносно простий і обчислювально ефективний, що робить його добре придатним для додатків у режимі реального часу. Крім того, він може обробляти високовимірні простори функцій, що корисно для обробки текстових даних.

Однак алгоритм PA може мати труднощі з виявленням більш складних зв'язків між словами та фразами. Тому він часто використовується в поєднанні з іншими моделями машинного навчання або методами для підвищення його продуктивності.

Отже, Двостороння LSTM, BERT та Пасивно-агресивний класифікатор є найбільш поширеними програмними методами виявлення фейкових новин. Кожен із цих способів має свої переваги і недоліки. Вибір методу, який буде використовуватися для виявлення фейкових новин, залежить від конкретних вимог і обмежень поставленого завдання. Двостороння LSTM і BERT можуть бути

більш придатними для завдань, які вимагають високої точності і можуть вмістити більші набори даних, тоді як пасивно-агресивні класифікатори можуть бути більш придатними для завдань з обмеженими маркованими даними або додатків у реальному часі.

**Постановка завдання.** Проаналізувавши наявні аналоги методу для виявлення фейкових новин, можна виділити наступні функціональні вимоги до ПЗ для виявлення фейкових новин і запобігання їх поширенню:

1. ПЗ повинно мати можливість збирати дані з різних джерел, таких як платформи соціальних мереж, новинні веб-сайти та інші онлайн-джерела.

2. ПЗ повинно мати можливість очищати, фільтрувати та попередньо обробляти зібрані дані, щоб переконатися, що вони точні та придатні для аналізу.

3. ПЗ повинно мати можливість витягувати відповідні функції з попередньо оброблених даних, такі як використовувана мова, тон автора та настрій тексту.

4. ПЗ повинно мати можливість створювати маркований навчальний набір даних, який включає як фейкові, так і реальні новини для розробки моделей машинного навчання.

5. ПЗ має використовувати алгоритми машинного навчання, такі як Bi-directional LSTM, BERT або Passive-Aggressive Classifier, для аналізу попередньо оброблених даних і виявлення фейкових новин.

6. ПЗ повинно мати можливість оцінювати точність і продуктивність моделей машинного навчання на тестовому наборі даних.

7. ПЗ повинно мати можливість виявляти фейкові новини в режимі реального часу та надавати сповіщення користувачам.

8. ПЗ повинно мати простий у використанні та інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс, який дозволяє користувачам отримувати доступ до результатів аналізу та вживати відповідних дій.

9. ПЗ повинно бути налаштовуваним, щоб дозволити користувачам налаштовувати параметри моделей машинного навчання та джерела даних відповідно до своїх конкретних потреб.

10. ПЗ має забезпечувати конфіденційність і безпеку даних користувачів і бути стійким до атак, таких як ворожі атаки, які намагаються обійти алгоритм виявлення фейкових новин.

**Обґрунтування мови та середовища програмування.** Для розроблення ПЗ методу виявлення фейкових новин було проаналізовано наявні мови програмування, їх сильні та слабкі сторони і вибрано найбільш оптимальну мову програмування для досягнення належної роботи ПЗ відповідно до поставлених завдань. Було встановлено:

Java – широко використовувана мова програмування для розробки додатків корпоративного рівня, включаючи програми машинного навчання. Наявність бібліотек і фреймворків, таких як Apache Mahout і Weka, робить Java хорошим вибором для ПЗ для виявлення підроблених новин на основі машинного навчання.

R є популярною мовою програмування для статистичних обчислень і широко використовується при розробці додатків машинного навчання. Наявність бібліотек і фреймворків, таких як Caret і MLR, робить R хорошим вибором для ПЗ для виявлення підроблених новин на основі машинного навчання.

C++ є високопродуктивною мовою програмування і зазвичай використовується для розробки інтенсивних обчислювальних додатків, включаючи програми машинного навчання. Наявність бібліотек і фреймворків, таких як TensorFlow і Caffe, робить C++ хорошим вибором для ПЗ для виявлення підроблених новин на основі машинного навчання.

JavaScript є популярною мовою програмування для веб-розробки і все частіше використовується для розробки додатків машинного навчання. Наявність бібліотек та фреймворків, таких як TensorFlow.js та Brain.js, робить JavaScript хорошим вибором для веб-програмного забезпечення для виявлення підроблених новин.

Python є популярною та потужною мовою для розробки ПЗ для виявлення фейкових новин, особливо для підходів, що ґрунтуються на машинному навчанні. Хоча він має деякі обмеження, його сильні сторони, включаючи простоту використання, гнучкість і багатий набір бібліотек та фреймворків, роблять його гарним вибором для розробки складних і точних алгоритмів виявлення фейкових новин. На підставі проведеного аналізу мови програмування Python було прийнято рішення щодо використання саме цієї мови для написання коду ПЗ для модифікованого методу виявлення фейкових новин.

Під час роботи над дослідженням було проаналізовано декілька середовищ розробки з метою вибору найбільш оптимального для розробки ПЗ методу виявлення фейкових новин. До найбільш поширених можна віднести:

Anaconda – це програмне середовище, яке має різноманітні інструменти і бібліотеки для машинного навчання та аналізу даних. Anaconda підтримує декілька мов програмування, таких як Python, R та Java.

Visual Studio Code – це легкий редактор відкритого коду, який підтримує кілька мов програмування. Він включає такі функції, як налагодження, контроль версій і розширення для машинного навчання та аналізу даних.

PyCharm – це потужна IDE Python, яка надає такі функції, як налагодження, завершення коду та контроль версій. Він також включає інтеграцію з бібліотеками машинного навчання, такими як TensorFlow і Keras.

RStudio – інтегроване середовище розробки (IDE) з відкритим вихідним кодом для мови програмування R. Він включає такі функції, як завершення коду, налагодження та візуалізація інструментів для аналізу даних.

Eclipse – популярна IDE з відкритим вихідним кодом, яка підтримує кілька мов програмування, включаючи Java, C++ та Python. Вона включає такі функції, як налагодження, завершення коду та контроль версій.

При виборі середовища розробки ПЗ для розробки ПЗ для виявлення фейкових новин нами було враховано такі фактори, як використовувана мова програмування, доступність бібліотек машинного навчання та аналізу даних, а також простота використання для розробників. Насамперед, вибір середовища розробки ПЗ залежав від конкретних потреб і вимог проєкту. Саме тому для розробки модифікованого методу виявлення фейкових новин нами було обрано середовище Python IDLE. Це зумовлено тим, що він поставляється з такими функціями, як оболонка Python, яка є інтерактивним інтерпретатором. Він має широкі функції, такі як автодоповнення, підсвічування синтаксису, розумний відступ і базовий інтегрований відладчик.

**Результати досліджень,** отримані в роботі: розроблено ПЗ, в якому використовується алгоритмічно-програмний метод для виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання – це застосунок, що містить користувацький інтерфейс. Застосу-

нок для виявлення фейкових новин – це програмне рішення, призначене для боротьби з поширенням фейкової інформації за допомогою алгоритмічно-програмних методів та алгоритмів машинного навчання. Основною метою цього додатка є швидке та точне виявлення фейкових новин, запобігання їх поширенню та пом'якшення потенційного негативного впливу на суспільне життя. Спеціально орієнтоване на користувачів соціальних мереж, це ПЗ забезпечує зручний інтерфейс, щоб надати людям можливість приймати обґрунтовані рішення щодо автентичності новин, з якими вони стикаються.

Ключові особливості:

1. Алгоритми машинного навчання: ПЗ включає алгоритми машинного навчання, які були навчені на великих наборах даних перевірених новинних статей та зразків фейкових новин. Ці алгоритми аналізують різні лінгвістичні та контекстуальні особливості новинних статей, щоб відрізнити справжню та фейкову інформацію.

2. Аналіз тексту та обробка природної мови: додаток використовує методи аналізу тексту та обробку природної мови (NLP) для вилучення значущої інформації з новинних статей. Він аналізує такі фактори, як мовні моделі, настрої, стиль письма та лексичні сигнали, щоб оцінити достовірність вмісту.

3. Джерела даних та агрегація: ПЗ інтегрується з кількома надійними джерелами даних, включаючи авторитетні новинні агентства, організації з перевірки фактів та звіти, створені користувачами. Він агрегує дані з цих джерел для підвищення точності процесу виявлення.

4. Виявлення в режимі реального часу: додаток працює в режимі реального часу, дозволяючи користувачам оперативно перевіряти справжність новинних статей, перш ніж ділитися ними на платформах соціальних мереж. Він аналізує надану статтю та генерує оцінку довіри або мітку, що вказує на ймовірність того, що вміст є фальшивим.

5. Інтерфейс користувача: ПЗ має інтуїтивно зрозумілий та зручний інтерфейс, доступний на персональних комп'ютерах або мобільних пристроях. Інтерфейс забезпечує простий і зрозумілий досвід, дозволяючи користувачам аналізувати статті та переглядати результати виявлення.

Загалом розроблений нами застосунок для виявлення фейкових новин використовує

модифікований метод та алгоритми машинного навчання, щоб забезпечити зручне рішення для виявлення та запобігання поширенню фейкової інформації. Розроблення графічного інтерфейсу, як правило, передбачає використання певного набору віджетів – елементів керування, які є зручними як для користувача, оскільки використовуються в більшості застосунків і мають приблизно однаковий вигляд і поведінку в рамках однієї платформи, так і для розробника, оскільки вони вже реалізовані в численних бібліотеках, які реалізують самі елементи керування, а їх властивості та поведінка швидко та просто налаштовуються відповідно до потреб проєкту. Для реалізації інтерфейсу в проєкті використана бібліотека `tkinter`, що є вбудованою бібліотекою Python.

Дизайн інтерфейсу відповідає функціональним вимогам проєкту. Враховуючи вимоги, інтерфейс містить секцію зміни налаштувань, що керують поведінкою ПЗ. Головна функція цього ПЗ – це повідомлення користувача про наявність фейкової інформації в тестованому тексті та, відповідно, виявлення фейкових новин.

Для вирішення проблеми поширення фейкових новин нами було розроблено модифікований метод виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання, який за вхідні дані приймає текст змісту новин, що потребують перевірки на наявність фейкової інформації.

Загалом цей метод складається з трьох етапів:

1. Класифікація вхідних даних за мовою тексту.

2. Кластеризація вхідних даних за вмістом.

3. Виявлення наявності фейкової інформації у вхідних даних.

На *першому етапі* методу після отримання вхідних даних відбувається визначення мови, до якої належить текст у вхідних даних. З цією метою використовується алгоритм, який навчений працювати з певним сталим наперед заданим набором мов. Доки використовується конкретна мова, в цьому алгоритмі «літерами» визначаються лише символи її алфавіту.

Під час навчання алгоритму:

1. Як вхідні дані використовується набір текстів, які написані різними мовами.

2. Для кожної мови відбуваються такі дії:

2.1. Створюється пустий словник з назвою «словник частот».

2.2. Проходячи кожний текст для певної мови від початку до кінця для кожної послідовної пари літер у тексті:

2.2.1. Якщо в «словнику частот» є запис, в якому ключ має таке саме значення, як певна послідовна пара літер, тоді значення лічильника запису з цим ключем збільшується на 1.

2.2.2. Якщо в «словнику частот» немає запису, в якому ключ має таке саме значення, як певна послідовна пара літер, тоді в «словник частот» додається запис з ключем, рівним цій послідовній парі літер, та обнуленим лічильником як значення.

3. Після побудови «словників частот» для мов, використовуючи всі вхідні дані, «словники частот» перетворюються на «словники ймовірностей» шляхом отримання суми всіх значень для кожного «словника частот» і ділення всіх значень елементів кожного «словника частот» на відповідну суму.

4. Для кожного отриманого «словника ймовірностей» береться натуральний логарифм від кожного значення ймовірності і присвоюється на місце того значення ймовірності, таким чином утворюючи «словники логарифмів ймовірностей».

Під час використання алгоритму:

1. Алгоритм отримує на вхід один текст;

2. Для кожного «словника логарифмів ймовірностей» виконуються такі кроки:

2.1. Створюються змінні «лічильник пар літер» і «лічильник логарифмів» та призначається їм значення 0.

2.2. Для кожної пари послідовних літер у тексті, що наявна в цьому «словнику логарифмів ймовірностей», збільшується значення «лічильника логарифмів» на відповідне значення запису в «словнику логарифмів ймовірностей» та збільшується значення «лічильника пар літер» на 1.

2.3. Діляться значення «лічильника логарифмів» на значення «лічильника пар літер» та зберігається результат як «остаточне значення» для цього «словника логарифмів ймовірностей».

3. Мова, словник якої має найбільше отримане значення, є передбаченою мовою тексту.

Після цього виконується **другий етап** методу, в якому відбувається визначення групи, до якої належить текст у вхідних даних за

змістом. При визначенні групи, до якої належить текст у вхідних даних, використовується наступний алгоритм, який використовує отримані результати першого етапу. Перед виконанням цього алгоритму спочатку відбувається обробка і зміна тексту вхідних даних:

1. Видаляються з вхідних даних тексту всі символи, які не є літерами визначеної мови тексту, та замінюються на пробіли.

2. Переносяться всі літери тексту до нижнього реєстру.

3. Текст розбивається пробілами на список слів, при цьому прибираючи пусті слова.

4. Вилучаються «стоп-слова» зі списку слів.

5. Проводиться стемінг кожного слова.

Під час навчання алгоритму:

1. При навчанні певний алгоритм приймає за вхідні дані лише тексти тією самою мовою для конкретної моделі (до попередньої обробки тексту вхідних даних).

2. Створює список «унікальних слів» і робить його пустим.

3. Для кожного навчального тексту спочатку після попередньої обробки тексту відбувається додавання всіх слів зі списку слів цього тексту до списку «унікальних слів», яких там немає.

4. Після цього для кожного навчального тексту:

4.1. Використовуючи список «унікальних слів», визначаються значення TF-IDF для кожного «унікального слова», використовуючи список слів цього тексту як документ.

4.2. Створюється вектор зі значень TF-IDF для даного тексту.

5. Використовуючи алгоритм k-means++, кластеризуються тексти за їхніми векторами.

Під час використання алгоритму:

1. Для кожного слова зі списку «унікальних слів» визначаються значення TF-IDF в цьому списку слів і, таким чином, створюється вектор значень.

2. Кластеризується цей вектор, використовуючи алгоритм k-means++ [15].

Насамкінець виконується **третій етап** методу, в якому виявляється наявність або відсутність фейкової інформації у вхідних даних. На цьому етапі використовується оброблений текст вхідних даних з другого етапу за допомогою алгоритму BERT для класифікації вхідних даних на наявність фейкової інформації. Для кожної унікальної комбінації

мови в першому етапі та кластеру в другому етапі створюється своя модель алгоритму BERT при навчанні. Після цього при використанні цього методу вибирається відповідна модель залежно від результатів першого та другого етапів. Таким чином можна зробити моделі алгоритму BERT меншого розміру та покращити точність їх результатів. У цьому алгоритмі застосовується модель «bert-large-uncased».

Цей алгоритм має чотири види використання:

1. Задача класифікації пари речень.
2. Задача класифікації одного речення.
3. Задача отримання відповіді на запитання.
4. Задача тегування одного речення.

В алгоритмічно-програмному методі виявлення фейкових новин алгоритм BERT застосовується таким чином:

1. Спочатку вхідні дані (оброблені на другому етапі) будуть перетворені так:

1.1. Обробляються всі слова у вхідних даних, використовуючи спеціальний вбудований токенизатор BERT.

1.2. Якщо довжина списку слів більша, ніж певне значення (128), то розбивається список слів на набір списків слів таким чином, щоб кожний список у наборі був меншим за вищезазначене значення.

1.3. Для кожного списку слів у наборі:

1.3.1. Додається спеціальне слово «[CLS]» перед початком списку слів.

1.3.2. Додається спеціальне слово «[SEP]» після кінця списку слів.

1.3.3. Якщо цей список слів досі менший ніж вищезазначене значення, то додається спеціальне слово «[PAD]», доки довжина цього списку не буде дорівнювати вищезазначеному значенню.

1.3.4. Створюються «маски уваги» для всіх слів «[PAD]» у списку слів та додаються ці «маски уваги» до відповідного списку слів.

1.3.5. Перетворюються всі слова у списку слів на відповідні індекси, використовуючи спеціальний вбудований токенизатор BERT.

2. Для кожного списку індексів у наборі:

2.1. Використовуючи 2-й вид роботи алгоритму BERT і цю модель, обробляється список індексів та відповідна

«маска уваги» і отримується результат (значення від 0 до 1).

2.2. Результат свідчить про наявність фейкової інформації, якщо значення більше чи дорівнює 0.5, або про її відсутність – якщо менше 0.5.

3. Фінальним результатом у попередньому кроці буде те значення, яке трапилося більше разів, або наявність фейкової інформації, якщо кількість обох значень є однаковою.

3.1. Якщо відбувається навчання моделі: використовуючи фінальний результат, порівнюють його з очікуваним і при нерівності оптимізують модель, використовуючи оптимізатор Adam.

Алгоритм адаптивної оцінки моменту (Adam) [16] як алгоритм оптимізації використано замість класичного градієнтного спуску для ітераційного оновлення ваг мережі на основі навчальних даних. Це зумовлено його головною перевагою над подібними алгоритмами, а саме: можливістю адаптивно змінювати «швидкість навчання» моделі під час його використання, а також швидкість виконання та мала ресурсоемкість.

Отже, під час першого етапу цього методу відбувається навчання на великих наборах текстів відповідними мовами. На другому і третьому етапах методу навчання відбувається на тому самому наборі даних, що містять фейкові новини.

Кожна мова має власний набір кластерів k-means++ після навчання. Кожний кластер має власну модель BERT після навчання. Через це набори кластерів та відповідні моделі BERT для різних мов використовують набори даних, що містять фейкові новини відповідною мовою. Навчання кожної частини відбувається відповідно до описаної послідовності дій.

**Обговорення результатів.** Відповідно до сформованих функціональних вимог до ПЗ було розроблено застосунок, що містить програму, яку можна запустити, використовуючи програму Python. Ця програма при запуску відкриває вікно інтерфейсу застосунку. Користувач може використати це вікно, щоб ввести текст новини та перевірити її на наявність фейкової інформації. Розроблене ПЗ для виявлення фейкових новин відповідає нефункціональним вимогам і є сумісним з варіаціями операційних систем Windows та Linux. Також було розроблено зручний для користувача інтерфейс.

У процесі тестування ПЗ методу виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання було перевірено таке:

1. Функціональна працездатність можливості зміни налаштувань роботи застосунку.

2. Функціональна працездатність застосунку обробляти поданий текст і визначати наявність фейкових новин у ньому з достатньою точністю.

3. Відсоток правильних позитивних реакцій на наявність фейкових новин в аналізованому тексті.

4. Коректна робота мобільного застосунку на пристроях з операційними системами Windows та Linux.

5. Відповідність дизайну вимогам технічного завдання.

Тестування було виконано методом Black Box Testing. Зокрема було протестовано:

1. Виявлення швидкості та точності визначення фейкових новин.

2. Користувацький інтерфейс (зміни налаштувань, які застосовуються).

Було також проведено тестування швидкодії ПЗ на наборах даних із соціальних мереж. Результати тестування подано в таблицях 1 та 2. Після тестування було виявлено, що середня швидкодія застосунку при кількості 200 слів дорівнює 5 с.

**Таблиця 1. Результати тестування застосунку для виявлення фейкових новин за тривалістю роботи, секунд**

| Кількість слів у тексті | Тривалість роботи (с.) |      |      |        |
|-------------------------|------------------------|------|------|--------|
|                         | Цей метод              | BERT | PAC  | BiLSTM |
| 260                     | 5.3                    | 5.8  | 4.3  | 5.5    |
| 500                     | 7.1                    | 8.7  | 6.3  | 8.2    |
| 1000                    | 13.5                   | 17.2 | 11.8 | 15.8   |
| 5000                    | 20.7                   | 28.5 | 18.4 | 25.4   |

**Таблиця 2. Результати тестування застосунку для виявлення фейкових новин за точністю виявлення фейків, %**

| Кількість слів у тексті | Точність виявлення фейків (%) (TP) |      |      |        |
|-------------------------|------------------------------------|------|------|--------|
|                         | Цей метод                          | BERT | PAC  | BiLSTM |
| 260                     | 97.4                               | 97.1 | 96.4 | 95.4   |
| 500                     | 98.8                               | 97.6 | 96.9 | 96.1   |
| 1000                    | 99.3                               | 98.8 | 98.2 | 97.8   |
| 5000                    | 99.5                               | 99.1 | 98.9 | 98.4   |

За результатами перевірки та оцінки розробленого методу і застосунку для визначення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання за допомогою цього тестування було встановлено відсутність відхилень поведінки розробленого ПЗ від вимог, зазначених у технічному завданні (рисунки 1 та 2).



**Рисунок 1. Графік залежності тривалості роботи методів від довжини тексту**



**Рисунок 2. Графік залежності точності роботи методів від довжини тексту**

**Висновки.** Розроблено програмне забезпечення модифікованого методу виявлення фейкових новин, який дозволяє уникнути небезпек поширення фейків та запобігти їм завдяки тому, що він аналізує текст новин та повідомлень, визначає і повідомляє користувача про наявність фейкової інформації.

Експериментальним шляхом підібрано оптимальний варіант принципу дії методу та відповідного програмного забезпечення, а саме застосування стандартних алгоритмів нейронних мереж машинного навчання, які забезпечують коректне функціонування методу та ПЗ. Під час роботи застосунок аналізує наданий текст на наявність фейкової інформації. Після доопрацювання результати цього

проєкту можна застосувати для створення програмних систем промислового рівня для розв'язання прикладних проблем.

**Наукова новизна** дослідження полягає в тому, що було запропоновано модифікований метод виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання, який відрізняється від наявних методів використання ансамблю з трьох алгоритмів, результати кожного з яких використовуються для вибору компактніших спеціалізованих моделей для наступних алгоритмів, що в підсумку дозволяє пришвидшити процес виявлення фейкових новин у тексті на 30 %, порівняно з аналогами, а також зменшити середню хибність на 25 %.

**Практична цінність** дослідження полягає в тому, що за допомогою модифікованого методу та розробленого на його основі програмного забезпечення застосунку для виявлення фейкових новин можна успішно їх виявляти в соціальних мережах, а також запобігати їх поширенню. Особливо велике значення це має в умовах зростаючої деструктивної ролі мережевої війни, одним із інструментів якої є поширення фейків та дезінформації.

**Перспективи подальших досліджень.** У перспективі планується продовжити вдосконалювати процес визначення мови тексту та кластеризації тексту новин, а також дослідити використання інших методів для попереднього розподілу вхідних даних для прискорення та вдосконалення розробленого методу.

Детальний аналіз характеристик програмного застосунку дозволив дійти висновку, що покращення та розвиток програмного застосунку можливі у кількох різних напрямках, серед яких:

Досягнення *оптимізації та покращення ефективності* шляхом використання: більш оптимізованого алгоритму обробки тексту, інших алгоритмів для попереднього розподілу вхідних даних для прискорення та уточнення загального алгоритму тощо.

*Підтримка інших операційних систем:* поширення ПЗ для інших середовищ виконання, наприклад для операційної системи IOS, може значно розширити застосовність застосунку, але потребує застосування інших технологій, покращення продуктивності та зміни внутрішньої будови ПЗ для його підтримки на інших операційних системах.

*Рефакторинг ПЗ* можна проводити майже за будь-яких умов, оскільки він не відображається на поведінці ПЗ, а покращує стан кодової бази і для впровадження потребує тільки проведення локального тестування компонентів, які були змінені, щоб упевнитись, що поведінка ПЗ не змінилася.

### Список використаних джерел

- [1] А. Санжаровський, та В. Юрчишин, "Алгоритмічно-програмний метод для виявлення фейкових новин на основі алгоритмів машинного навчання", на *П'ятнадцятій наук. конф. магістрантів та аспірантів Прикладна математика та комп'ютинг (ПМК-2022)*, Київ, 16-18 листоп. 2022, с. 499-504.
- [2] Study: On Twitter, false news travels faster than true stories. [Online]. Available: <https://news.mit.edu/2018/study-twitter-false-news-travels-faster-true-stories-0308>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [3] Disinformation risk assessment: The online news market in the United States. [Online]. Available: <https://www.disinformationindex.org/country-studies/2022-12-16-disinformation-risk-assessment-the-online-news-market-in-the-united-states/>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [4] H. Alcott, and M. Gentzkow, "Social media and fake news in the 2016 election", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 31 (2), pp. 211-236. doi: 10.1257/jep.31.2.211.
- [5] K. Shu, A. Sliva, S. Wang, J. Tang, and H. Liu, "Fake news detection on social media: A data mining perspective", *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, vol. 19, iss. 101, pp. 22-36, Sept. 2017. doi: 10.1145/3137597.3137600.
- [6] K. Sharma, F. Qian, H. Jiang, and N. Ruchansky, "Combating fake news: A survey on identification and mitigation techniques", *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 10 (3), pp. 1-42, Apr. 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/332434399\\_Combating\\_Fake\\_News\\_A\\_Survey\\_on\\_Identification\\_and\\_Mitigation\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/332434399_Combating_Fake_News_A_Survey_on_Identification_and_Mitigation_Techniques). Accessed on: Jan. 20, 2023. doi: 10.1145/3305260.

- [7] B. D. Horne, and S. Adali, "This just in: Fake news packs a lot in title, uses simpler, repetitive content in text body, more similar to satire than real news", *ArXiv* abs/1703.09398, 2017. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/This-Just-In%3A-Fake-News-Packs-a-Lot-in-Title%2C-Uses-Horne-Adali/f8366afaf58bbb9db151a1168bb6f14b618955b4>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [8] D. Rothman, "Transformers for natural language processing: Build innovative deep neural network architectures for NLP with Python, PyTorch, TensorFlow, BERT, RoBERTa, and more"; Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd. Birmingham Mumbai, 2021.
- [9] P. Bahad, P. Saxena, and R. Kamal, "Fake news detection using bi-directional LSTM-recurrent neural network", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 165, pp. 74-82, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.072>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [10] S. M. Padnekar, G. S. Kumar, and P. Deepak, "Bilstm-autoencoder architecture for stance prediction", in *Proc. 2020 Int. Conf. on Data Science and Engineering (ICDSE)*, Kochi, India, pp. 1-5, Dec. 3-5, 2020.
- [11] E. Amer, K.-S. Kwak, and S. El-Sappagh, "Context-based fake news detection model relying on deep learning models". *Electronics*, vol. 11 (8), p. 1255, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11081255>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [12] A. Malakhov, A. Patruno, and S. Bocconi, "Fake news classification with BERT". [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2882/paper38.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [13] D. Jacob, C. Ming-Wei, L. Kenton, and T. Kristina, "BERT: Pre-training of deep bi-directional transformers for language understanding". [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1810.04805.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [14] Fake News Detection Using Passive-Aggressive Classifier. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7345-3\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7345-3_13). Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [15] D. Arthur, and S. Vassilvitskii, "k-means++: The advantages of careful seeding". [Online]. Available: <https://theory.stanford.edu/~sergei/papers/kMeansPP-soda.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [16] D. P. Kingma, and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization". [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. Accessed on: Jan. 20, 2023.

## References

- [1] A. Sanzharovsky, and V. Yurchyshyn, "Algorithmic-software method for detecting fake news based on machine learning algorithms", on *Fifteenth Sci. Conf. of Undergraduates and Graduate Students Applied Mathematics and Computing (PMK-2022)*, Kyiv, Nov. 16-18, pp. 499-504, 2022 [in Ukrainian].
- [2] Study: On Twitter, false news travels faster than true stories. [Online]. Available: <https://news.mit.edu/2018/study-twitter-false-news-travels-faster-true-stories-0308>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [3] Disinformation risk assessment: The online news market in the United States. [Online]. Available: <https://www.disinformationindex.org/country-studies/2022-12-16-disinformation-risk-assessment-the-online-news-market-in-the-united-states/>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [4] H. Alcott, and M. Gentzkow, "Social media and fake news in the 2016 election", *Journal of Economic Perspectives*, vol. 31 (2), pp. 211-236. doi: 10.1257/jep.31.2.211.
- [5] K. Shu, A. Sliva, S. Wang, J. Tang, and H. Liu, "Fake news detection on social media: A data mining perspective", *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, vol. 19, iss. 101, pp. 22-36, Sept. 2017. doi: 10.1145/3137597.3137600.
- [6] K. Sharma, F. Qian, H. Jiang, and N. Ruchansky, "Combating fake news: A survey on identification and mitigation techniques", *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, vol. 10 (3), pp. 1-42, Apr. 2019. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/332434399\\_Combating\\_Fake\\_News\\_A\\_Survey\\_on\\_Identification\\_and\\_Mitigation](https://www.researchgate.net/publication/332434399_Combating_Fake_News_A_Survey_on_Identification_and_Mitigation)

- Techniques. Accessed on: Jan. 20, 2023. doi: 10.1145/3305260.
- [7] B. D. Horne, and S. Adali, "This just in: Fake news packs a lot in title, uses simpler, repetitive content in text body, more similar to satire than real news", *ArXiv abs/1703.09398*, 2017. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/This-Just-In%3A-Fake-News-Packs-a-Lot-in-Title%2C-Uses-Horne-Adali/f8366afaf58bbb9db151a1168bb6f14b618955b4>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [8] D. Rothman, "Transformers for natural language processing: Build innovative deep neural network architectures for NLP with Python, PyTorch, TensorFlow, BERT, RoBERTa, and more"; Birmingham, UK: Packt Publishing Ltd. Birmingham Mumbai, 2021.
- [9] P. Bahad, P. Saxena, and R. Kamal, "Fake news detection using bi-directional LSTM-recurrent neural network", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 165, pp. 74-82, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.01.072>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [10] S. M. Padnekar, G. S. Kumar, and P. Deepak, "Bilstm-autoencoder architecture for stance prediction", in *Proc. 2020 Int. Conf. on Data Science and Engineering (ICDSE)*, Kochi, India, pp. 1-5, Dec. 3-5, 2020.
- [11] E. Amer, K.-S. Kwak, and S. El-Sappagh, "Context-based fake news detection model relying on deep learning models". *Electronics*, vol. 11 (8), p. 1255, 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics11081255>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [12] A. Malakhov, A. Patruno, and S. Bocconi, "Fake news classification with BERT". [Online]. Available: <http://ceur-ws.org/Vol-2882/paper38.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [13] D. Jacob, C. Ming-Wei, L. Kenton, and T. Kristina, "BERT: Pre-training of deep bi-directional transformers for language understanding". [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/1810.04805.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [14] Fake News Detection Using Passive-Aggressive Classifier. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7345-3\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-7345-3_13). Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [15] D. Arthur, and S. Vassilvitskii, "k-means++: The advantages of careful seeding". [Online]. Available: <https://theory.stanford.edu/~sergei/papers/kMeansPP-soda.pdf>. Accessed on: Jan. 20, 2023.
- [16] D. P. Kingma, and J. L. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization". [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. Accessed on: Jan. 20, 2023.

**A. I. Sanzharovskiy**, *Master*,  
e-mail: anatsanzh@gmail.com

**V. Ya. Yurchyshyn**, *Cand. Tech. Sc., Associate Professor*  
National Technical University of Ukraine  
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"  
Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

## MODIFIED METHOD FOR DETECTING FAKE NEWS BASED ON MACHINE LEARNING ALGORITHMS

*The object of research is the process of analyzing information in social media to identify fake news. The subject of research is the development of software of algorithmic-software method for detecting fake news. The aim of the work is to increase the average accuracy of the process of detecting fake news in social media by developing and implementing an algorithmic-software method for detecting fake news based on machine learning algorithms. Various methods of scientific research: analysis – to find out the advantages and disadvantages of existing methods for detecting fake news; comparison – when choosing the most optimal programming language and programming environment*

*for developing software to detect fake news; a method of reviewing existing literature to detect fake news, including academic publications, technical reports, and online resources; peer review method, which obtained information on the effectiveness of various methods for detecting fake news have been used. Through the use of these methods, a comprehensive understanding of the problem of detecting fake news has been obtained and effective software for detecting fake news has been developed. The scientific novelty of the work lies in the fact that a modified algorithmic-software method for detecting fake news based on machine learning algorithms has been proposed, which differs from the existing methods by using an ensemble of three algorithms, the results of each of which are used to select more compact specialized models for subsequent algorithms, which ultimately allows to speed up the process of detecting fake news in the text by 30% compared to analogs, and reduce the average falsehood by 25%. The practical value of the results obtained in the work lies in the fact that the developed software of the algorithmic-software method for detecting fake news will help to reduce the spread of fakes and detect them.*

**Keywords:** *algorithmic-software method, machine learning algorithms, methods of fake detection and recognition, BERT, LSTM, Passive-Aggressive Classifier.*

JEL 655.1+004.942

[0000-0002-0496-1381] **А. В. Кудряшова**, канд. техн. наук, доцент,  
e-mail: kudriashovaaliona@gmail.com  
Українська академія друкарства  
вул. Під Голоском, 19, м. Львів, 79020, Україна

## РАНЖУВАННЯ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ЯКІСТЬ РЕАЛІЗАЦІЇ ПІСЛЯДРУКАРСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

*У статті досліджено основні фактори, що впливають на якість реалізації післядрукарського опрацювання книжкових видань, а отже, і на якість кінцевого продукту – книги. Зокрема, проаналізовано сформовану множину факторів, що містить такі компоненти: виготовлення зошитів, скріплення, комплектування, покривний матеріал, оброблення книжкових блоків, оздоблення, кінцеве опрацювання, проєкт. Для виокремлення наведених факторів використано метод експертного оцінювання і залучено фахівців-практиків і представників наукової спільноти. Основна увага приділена встановленню та аналізу взаємозв'язків між факторами, що умовно поділені на дві категорії: прямі й опосередковані впливи і прямі й опосередковані залежності. При цьому під прямими впливами та залежностями розуміємо досяжності першого порядку, а під опосередкованими – другого. Для дослідження зв'язків між факторами використано метод ранжування, згідно з яким побудовано систему ієрархічних дерев: ієрархічні графи прямих та опосередкованих впливів на якість реалізації післядрукарського опрацювання книжкових видань; ієрархічні графи прямих та опосередкованих залежностей факторів реалізації післядрукарських процесів. Для математичного оцінювання кожному типу зв'язків присвоєно відповідні вагові коефіцієнти. Враховуючи кількість зв'язків певного типу для кожного фактора та їх вагові коефіцієнти, визначено інтегральні вагові значення факторів. Результатом оцінювання є встановлення рангів факторів. При цьому найвищий ранг присвоєно фактору із найбільшим підсумковим ваговим значенням. Відповідно, чим вищий ранг, тим пріоритетнішим є вплив аналізованого фактора.*

**Ключові слова:** поліграфія, книга, брошурувально-палітурні процеси, ієрархія, ранг, пріоритетність.

**Вступ.** Випуск книжкової продукції передбачає реалізацію трьох основних етапів: додрукарського опрацювання, друкування накладу та післядрукарського опрацювання. Додрукарська підготовка книжкових видань полягає у плануванні (тематичне та виробничо-технічне), художньо-технічному оформленні (підготовка видавничого оригіналу і макетування та верстання видання), підготовці та виведенні зверстаних сторінок на матеріальний або цифровий носій (монтажний спуск сторінок, запис зображення) [1]. Друкування книжкової продукції залежить від параметрів книги (обсяг, наклад тощо) та, відповідно, обраного способу друку (цифровий, офсетний та ін.). При цьому якість контролюється за допомогою пробних відбитків [2]. Віддруковані відбитки передаються у брошурувально-палітурний цех, де здійснюється післядрукарське опрацювання книжкових видань, яке, в першу чергу, залежить від типу покривельного матеріалу (обкладинка чи палітурка). Для

книжкових видань в обкладинці реалізуються брошурувальні процеси, а для видань в палітурці – як брошурувальні, так і палітурні. Під час післядрукарського опрацювання книжкових видань можуть виконуватися такі операції, як зіштовхування та розрізування аркушів, фальцювання аркушів, пресування зошитів, виготовлення додаткових елементів (наприклад форзаців), комплектування книжкових блоків, скріплення та оброблення блоків, оброблення корінців, виготовлення палітурок, оздоблення друкованої продукції, з'єднання блоків з обкладинками чи палітурками та ін. [3]. Якість готового видання обумовлюється якісним виконанням описаних етапів.

Аналізуючи сучасні дослідження і публікації, бачимо, що значна увага приділена формуванню якості додрукарських та друкарських процесів. Виокремлено та описано фактори, що впливають на якість додрукарської підготовки, з огляду на якість продукції, контроль ключових показників, забезпечення та

покращення якості реалізації операцій [4]. Досліджується вплив якості художнього оформлення книги та компетенції дизайнерів на якість додрукарської підготовки [5]. У [6] автор наводить детальний аналіз оцінювання якості графічного матеріалу. Описуються методики верстання сторінок задля забезпечення якості макету книги [7, 8]. Здійснюється прогнозна оцінка якості друкарського процесу, враховуючи ключові фактори впливу [9]. Розглядається формування якості відбитків різними способами друку: офсетним, цифровим [10], флексографічним [11] та ін. Однак недостатньо уваги приділено визначенню ієрархічної залежності факторів впливу на якість післядрукарських процесів.

У цій роботі визначено пріоритетність факторів післядрукарського опрацювання книжкових видань за методом ранжування. Отримані знання є основою для розроблення інформаційної технології прогностичного оцінювання якості післядрукарських процесів, що слугуватиме для автоматизації управління та формування базису для прийняття управлінських рішень.

Передумовою для популяризації української книги в Україні та за кордоном є виготовлення високоякісної книжкової продукції та формування конкурентоздатної ціни, чому, безумовно, сприяє використання інформаційних технологій у поліграфічному виробництві.

**Мета та задачі дослідження.** Метою цього дослідження є синтез моделі пріоритетного впливу факторів на якість реалізації післядрукарських процесів, використовуючи метод ранжування факторів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

- проаналізувати множину факторів впливу на якість післядрукарського опрацювання книжкових видань;
- розробити ієрархічні дерева зв'язків між факторами, враховуючи прямі й опосередковані впливи та залежності;
- встановити кількість прямих та опосередкованих впливів і залежностей для кожного фактора досліджуваного технологічного процесу;
- визначити ранг кожного фактора за методом ранжування;
- визначити рівень пріоритетності кожного фактора;

– синтезувати модель пріоритетного впливу факторів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо особливості визначення пріоритетів факторів впливу на якість післядрукарського опрацювання книжкових видань за методом ранжування.

**Опис методу.** Метод ранжування використовується для визначення, уточнення або підтвердження рівня пріоритетності факторів впливу на якість досліджуваного технологічного процесу. Цей метод полягає в аналізі прямих та опосередкованих впливів і залежностей для кожного виокремленого фактора та синтезі деревовидних ієрархічних моделей. У результаті визначаються ранги факторів, що наближає моделювання до реальних умов перебігу післядрукарських процесів. Крім цього, варто зазначити, що кожному типу зв'язку присвоюється певний числовий показник, що дає можливість здійснювати математичне оцінювання [13, 14, 15].

Зважаючи на те, що усі поліграфічні процеси містять множини факторів впливу на якість їхньої реалізації, нехай  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  буде певною множиною поліграфічних процесів, а  $H = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_m}\}$  буде множиною впливу на конкретний технологічний процес поліграфічного виробництва, де  $n_m$  – кількість факторів  $m$ -го процесу. Тоді:

$$Q(H_k) = \bigcup_{j=1}^n \omega(H_{jk}), \quad (k=1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

де:  $Q(H_k)$  – функція якості  $m$ -го процесу;  $\omega(H_{jk})$  – вагове значення якості, доданої  $j$ -м фактором у  $k$ -й процес. Зважаючи на наведені твердження, представимо означення таким чином:

$$(\exists p)(\forall h) B(h_k); \quad x \in X; \quad h \in H. \quad (2)$$

Ранги та, відповідно, пріоритет кожного фактора визначаються з урахуванням значення вагового коефіцієнта. Відомо, що серед множини виокремлених факторів впливу на якість досліджуваного технологічного процесу завжди існує хоча б один пріоритетний. Тоді для множини вагових значень факторів  $m$ -го технологічного процесу  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_m}\}$ , якщо

$$C(v) = \max\{v_1, v_2, \dots, v_{n_m}\}, \text{ отримаємо} \\ (\exists p)(\forall v) C(v); \quad x \in X; \quad v \in V. \quad (3)$$

Наявність зв'язків між факторами уможливорює побудову графів. Дослідження цих зв'язків у первинній моделі, що сформована, зважаючи на судження експертів, дозволяє визначити початкові ранги факторів. Модель пріоритетного впливу факторів візуалізує тільки переваги між аналізованими факторами, тож завданням наступного дослідження буде побудова матриці попарних порівнянь факторів та визначення координат головного власного вектора матриці, що дозволить деталізувати вагові значення факторів.

Якщо  $D(w) = v_j > v_{j+1}$  для  $(j = 1, 2, \dots, n-1)$ , правильним буде такий запис:

$$(\forall v) D(v); \quad v \in V. \quad (4)$$

Зважаючи на наведені твердження, синтезування моделі пріоритетного впливу факторів на якість досліджуваного технологічного процесу здійснюється шляхом встановлення множини факторів, формування й аналізу початкової моделі, яка відображає зв'язки між факторами, виокремлені на основі експертних суджень [13, 15].

**Вихідні дані.** Наведемо множину факторів, що здійснюють вплив на якість реалізації післядрукарських процесів  $H = \{H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7, H_8\}$ , де  $H_1$  – виготовлення зошитів,  $H_2$  – скріплення книжкових блоків,  $H_3$  – комплектування книжкових блоків,  $H_4$  – тип та особливості покривного матеріалу,  $H_5$  – оброблення книжкових блоків,  $H_6$  – оздоблення друкованої продукції,  $H_7$  – кінцеве опрацювання,  $H_8$  – проект післядрукарського опрацювання книжкових видань [12]. Означимо прямі й опосередковані впливи та залежності між факторами. Вважатимемо, що « $\rightarrow$ » – прямий вплив, « $\rightarrow(\dots)$ » – опосередкований вплив, « $\leftarrow$ » – пряма залежність, « $\leftarrow(\dots)$ » – опосередкована залежність, « $\wedge$ » – логічне «і», « $\leftrightarrow$ » – відсутність зв'язків.

Впливи факторів післядрукарського опрацювання книжкових видань матимуть такий вигляд:

$$\begin{aligned} H_1 &\rightarrow H_2 \wedge H_1 \rightarrow (H_4, H_5, H_7) \wedge H_1 \rightarrow \\ H_3 \wedge H_1 &\rightarrow (H_2, H_4, H_5) \wedge H_1 \rightarrow H_6 \wedge H_1 \rightarrow \\ &(H_7); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2 &\rightarrow H_4 \wedge H_2 \rightarrow (H_6, H_7) \wedge H_2 \rightarrow \\ H_5 \wedge H_2 &\rightarrow (H_4, H_6) \wedge H_2 \rightarrow H_7; \\ H_3 &\rightarrow H_2 \wedge H_3 \rightarrow (H_4, H_5, H_7) \wedge H_3 \rightarrow \\ H_4 \wedge H_3 &\rightarrow (H_6, H_7) \wedge H_3 \rightarrow H_5 \wedge H_3 \rightarrow \\ &(H_4, H_6); \\ H_4 &\rightarrow H_6 \wedge H_4 \rightarrow (H_7) \wedge H_4 \rightarrow H_7; \\ H_5 &\rightarrow H_4 \wedge H_5 \rightarrow (H_6, H_7) \wedge H_5 \rightarrow \\ H_6 \wedge H_5 &\rightarrow (H_7); \\ H_6 &\rightarrow H_7; \\ H_7 &\leftrightarrow H_7; \\ H_8 &\rightarrow H_1 \wedge H_8 \rightarrow (H_2, H_3, H_6) \wedge H_8 \rightarrow \\ H_2 \wedge H_8 &\rightarrow (H_4, H_5, H_7) \wedge H_8 \rightarrow H_3 \wedge H_8 \rightarrow \\ &(H_2, H_4, H_5) \wedge H_8 \rightarrow H_4 \wedge H_8 \rightarrow (H_6, H_7) \wedge \\ H_8 &\rightarrow H_5 \wedge H_8 \rightarrow (H_4, H_6) \wedge H_8 \rightarrow H_6 \wedge H_8 \rightarrow \\ &(H_7) \wedge H_8 \rightarrow H_7. \end{aligned}$$

Залежності факторів післядрукарського опрацювання книжкових видань:

$$\begin{aligned} H_1 &\leftarrow H_8; \\ H_2 &\leftarrow H_1 \wedge H_2 \leftarrow (H_8) \wedge H_2 \leftarrow H_3 \wedge H_2 \\ &\leftarrow (H_1, H_8) \wedge H_2 \leftarrow H_8; \\ H_3 &\leftarrow H_1 \wedge H_3 \leftarrow (H_8) \wedge H_3 \leftarrow H_8; \\ H_4 &\leftarrow H_2 \wedge H_4 \leftarrow (H_1, H_3, H_8) \wedge H_4 \leftarrow \\ H_3 \wedge H_4 &\leftarrow (H_1, H_8) \wedge H_4 \leftarrow H_5 \wedge H_4 \leftarrow \\ &(H_2, H_3, H_8) \wedge H_4 \leftarrow H_8; \\ H_5 &\leftarrow H_2 \wedge H_5 \leftarrow (H_1, H_3, H_8) \wedge H_5 \leftarrow \\ H_3 \wedge H_5 &\leftarrow (H_1, H_8) \wedge H_5 \leftarrow H_8; \\ H_6 &\leftarrow H_1 \wedge H_6 \leftarrow H_8 \wedge H_6 \leftarrow H_4 \wedge H_6 \leftarrow \\ &(H_2, H_3, H_5, H_8) \wedge H_6 \leftarrow H_5 \wedge H_6 \leftarrow \\ &(H_2, H_3, H_8) \wedge H_6 \leftarrow H_8; \\ H_7 &\leftarrow H_2 \wedge H_7 \leftarrow (H_1, H_3, H_8) \wedge H_7 \leftarrow \\ H_4 \wedge H_7 &\leftarrow (H_2, H_3, H_5, H_8) \wedge H_7 \leftarrow H_6 \wedge \\ H_7 &\leftarrow (H_1, H_4, H_5, H_8) \wedge H_7 \leftarrow H_8; \\ H_8 &\leftrightarrow H_8. \end{aligned}$$

**Побудова ієрархічних графів.** Враховуючи формалізоване представлення зв'язків між факторами досліджуваного технологічного процесу, отримане шляхом експертного оцінювання, розробимо ієрархічні дерева зв'язків, що містять три рівні ієрархії. На першому рівні (зверху) зображено конкретний аналізований фактор, на другому – прямі впливи або залежності, на третьому – опосередковані (рисунки 1 та 2).

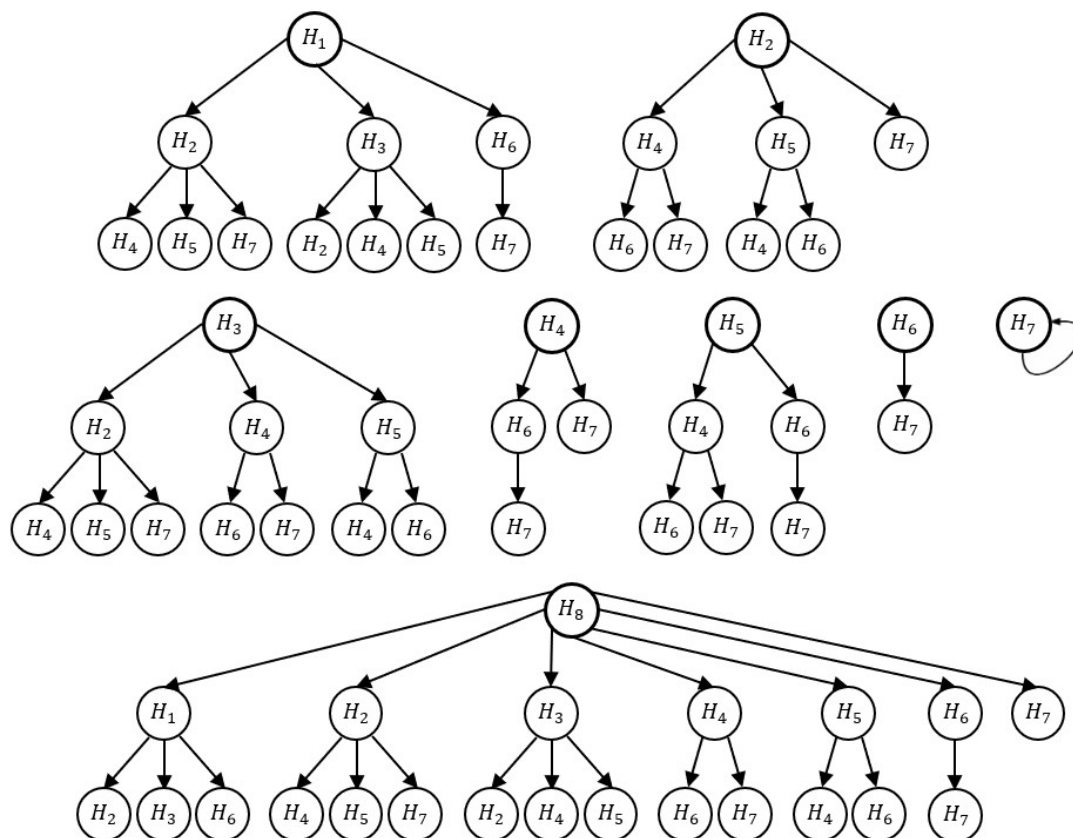


Рисунок 1. Ієрархічні графи прямих та опосередкованих впливів факторів реалізації післядрукарських процесів

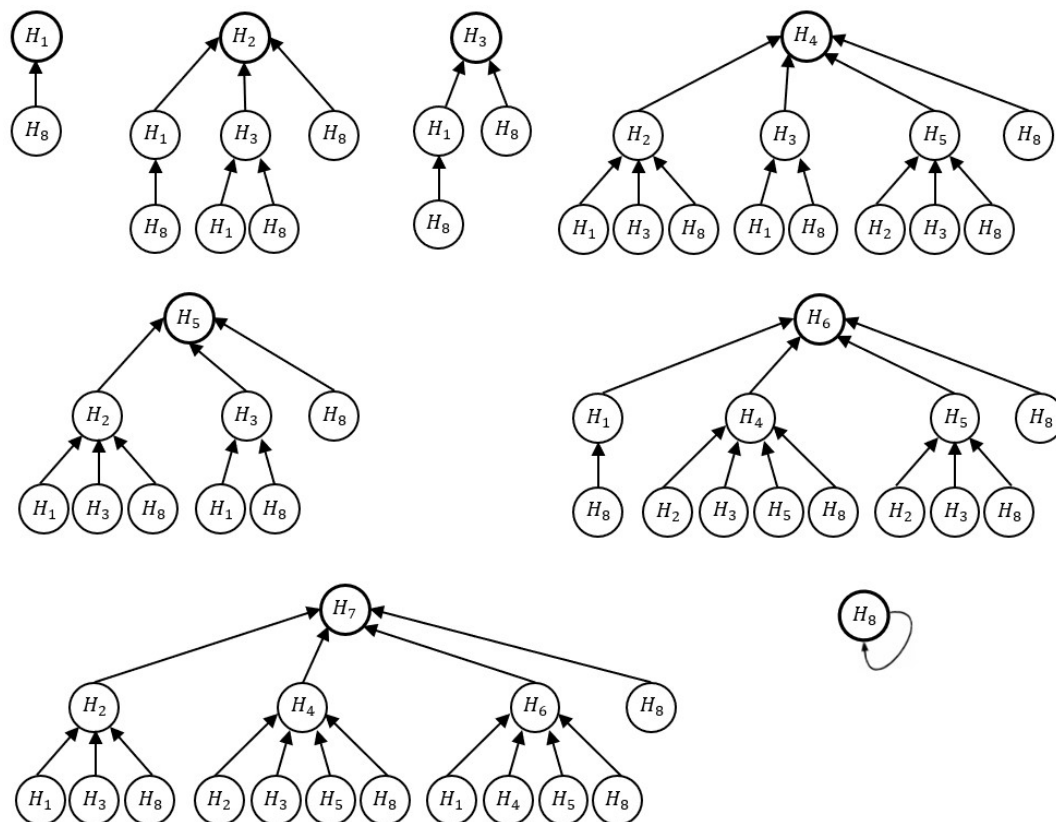


Рисунок 2. Ієрархічні графи прямих та опосередкованих залежностей факторів реалізації післядрукарських процесів

**Результати досліджень.** Вихідними даними для встановлення пріоритетності факторів за методом ранжування є кількість прямих та опосередкованих впливів і залежностей між факторами, а також їх вагові коефіцієнти. Введемо певні позначення для обчислення сумарних вагових значень зв'язків між факторами та їх інтегральних залежностей від інших факторів:  $k_{ij}$  – кількість залежностей або впливів  $j$ -го фактора при  $(j=1, \dots, n)$ ;  $v_i$  – вага  $i$ -го виду. Кількісні значення індексів будуть такими: для впливів першого порядку  $i=1$ , для впливів другого порядку  $i=2$ , для залежностей першого порядку  $i=3$ , для залежностей другого порядку  $i=4$ . Припустимо, що ваги для впливів першого та другого порядків будуть додатними, тобто  $v_1 > 0$ ,  $v_2 = v_1 / 2$ , відповідно ваги залежностей будуть від'ємними:  $v_3 < 0$ ,  $v_4 = v_3 / 2$ . Інтегральними ваговими значеннями факторів, що визначаються як сума ваг усіх видів зв'язків, будуть  $H_{ij}$ . Отримаємо таку формулу для розрахунків:

$$H_{ij} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n q_{ij} v_i, \quad (5)$$

де  $n$  – номер фактора післядрукарського процесу.

Згідно з початковими умовами  $v_3 < 0$  і  $v_4 < 0$ , тож  $H_{3j} < 0$  і  $H_{4j} < 0$ . Для приведення вагових значень факторів «до початку координат», тобто, щоб усі отримані величини були додатними, потрібно перенести гістограму інтегрального графічного представлення

зв'язків усіх видів вверх, використовуючи таке співвідношення:

$$\Delta_j = \max |H_{3j}| + \max |H_{4j}|, \quad (j=1, 2, \dots, n). \quad (6)$$

Представимо формулу для визначення підсумкових ваг факторів, враховуючи описані умови:

$$H_{Fj} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^n (k_{ij} v_i + \Delta_j), \quad (7)$$

де  $\Delta_j = \max |H_{3j}| + \max |H_{4j}|, (j=1, 2, \dots, n)$  [15].

Для обчислення підсумкових ваг факторів приймемо такі умовні значення вагових коефіцієнтів зв'язків:  $v_1 = 10$  у. о.,  $v_2 = 5$  у. о.,  $v_3 = -10$  у. о.,  $v_4 = -5$ .

Наведемо приклад обчислень для фактора  $H_1$  (виготовлення зошитів):

$$H_{11} = k_{11} \times v_1 = 3 \times 10 = 30,$$

$$H_{21} = k_{21} \times v_2 = 7 \times 5 = 35,$$

$$H_{31} = k_{31} \times v_3 = 1 \times (-10) = -10,$$

$$H_{41} = k_{41} \times v_4 = 0 \times (-5) = 0.$$

Тоді підсумкова вага для фактора  $H_1$  (виготовлення зошитів) матиме вигляд:

$$H_{F1} = H_{11} + H_{21} + H_{31} + H_{41} + |H_{37} + H_{47}| = 30 + 35 - 10 + 95 = 150$$

За отриманим підсумковим ваговим значенням для першого фактора та, враховуючи значення інших факторів, визначено його ранг і рівень пріоритетності. Аналогічно здійснюються обчислення для інших факторів. Результати проведених розрахунків подано у таблиці 1.

**Таблиця 1. Розрахункові дані та ранжування факторів реалізації післядрукарських процесів**

| Номер фактора, $j$ | $k_{1j}$ | $k_{2j}$ | $k_{3j}$ | $k_{4j}$ | $H_{1j}$ | $H_{2j}$ | $H_{3j}$ | $H_{4j}$ | $H_{Fj}$ | Ранг фактора $r_i$ | Рівень пріоритетності |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------------|-----------------------|
| 1                  | 3        | 7        | 1        | 0        | 30       | 35       | -10      | -0       | 150      | 7                  | 2                     |
| 2                  | 3        | 4        | 3        | 3        | 30       | 20       | -30      | -15      | 100      | 5                  | 4                     |
| 3                  | 3        | 7        | 2        | 1        | 30       | 35       | -20      | -5       | 135      | 6                  | 3                     |
| 4                  | 2        | 1        | 4        | 8        | 20       | 5        | -40      | -40      | 40       | 3                  | 6                     |
| 5                  | 2        | 3        | 3        | 5        | 20       | 15       | -30      | -25      | 75       | 4                  | 5                     |
| 6                  | 1        | 0        | 4        | 8        | 10       | 0        | -40      | -40      | 25       | 2                  | 7                     |
| 7                  | 0        | 0        | 4        | 11       | 0        | 0        | -40      | -55      | 0        | 1                  | 8                     |
| 8                  | 7        | 14       | 0        | 0        | 70       | 70       | 0        | 0        | 235      | 8                  | 1                     |

Базуючись на отриманих даних, побудуємо модель пріоритетного впливу факторів на якість реалізації післядрукарських процесів (рисунок 3). На першому рівні ієрархічної моделі буде фактор  $H_8$  (проект післядрукарського опрацювання книжкових видань), адже згідно з отриманими результатами

у нього найбільший ранг та найвищий рівень пріоритетності. Отже, саме проект є визначальним фактором впливу на якість реалізації досліджуваного процесу. Інші фактори також розміщені згідно з отриманими рівнями пріоритетності (останній стовпець таблиці 1).



Рисунок 3. Модель ієрархії факторів впливу на реалізацію післядрукарських процесів

**Обговорення результатів.** Запропонована модель пріоритетного впливу факторів на якість реалізації післядрукарського опрацювання книжкових видань розроблена з урахуванням ваг факторів та, відповідно їх рангів. При цьому впливи та залежності між факторами визначалися за методом експертного оцінювання, що уможливило отримання достовірних результатів дослідження. Модель формує чітке розуміння важливості факторів серед управлінського складу поліграфічних підприємств, зокрема серед інженерів брошуровально-палітурної дільниці. Така модель сприяє прийняттю правильних та усвідомлених управлінських рішень, адже вказує на відносну важливість факторів. Крім того, ієрархізація факторів впливу на аналізований процес є основою для розроблення інформаційної технології прогностичного оцінювання якості післядрукарських процесів. Випуск високоякісної книжкової продукції є надзвичайно важливим для формування соціально-культурного середовища в Україні.

**Висновки.** У статті досліджено фактори впливу на якість реалізації післядрукарських процесів. Зокрема, наведено множину факторів та описано зв'язки між ними. Розроблено ієрархічні дерева зв'язків між факторами,

враховуючи впливи та залежності. Для визначення рангів факторів використано метод ранжування. Фактор із найвищим рангом, відповідно, отримав перший рівень пріоритетності; фактор із найнижчим рангом – найнижчий пріоритет. За встановленими рівнями пріоритетності факторів синтезовано модель пріоритетного впливу факторів на якість реалізації післядрукарських процесів. Згідно з отриманими результатами найвищий рівень пріоритетності належить фактору «проект», другий рівень – фактору «виготовлення зошитів», третій – «комплектування», четвертий – «скріплення», п'ятий – «оброблення книжкових блоків», шостий – «покривний матеріал», сьомий – «оздоблення», восьмий (найнижчий пріоритет серед виокремленої множини) – «кінцеве опрацювання».

**Наукова новизна** дослідження полягає в такому: визначено ваги та ранги факторів післядрукарських процесів за методом ранжування; за рангами факторів встановлено пріоритетність їхнього впливу на процес та побудовано модель ієрархії факторів впливу на якість післядрукарського опрацювання книжкових видань.

**Практична значущість.** Закладено основи формування стратегії прогностичного

оцінювання якості післядрукарських процесів, що безпосередньо впливає на якість готової книжкової продукції.

#### **Перспективи подальших досліджень.**

Подальші дослідження полягатимуть у встановленні інтегрального показника якості післядрукарських процесів і розробленні інформаційної технології прогностичного оцінювання якості, що сприятиме автоматизації післядрукарських процесів.

#### **Список використаних джерел**

- [1] В. М. Сеньківський, та О. І. Осінчук, "Класифікація факторів додрукарських процесів", *Наукові записки [Української академії друкарства]*, № 1 (54), с. 60-67, Львів, 2017.
- [2] Handbook on Printing Technology (Offset, Flexo, Gravure, Screen, Digital, 3D Printing with Book Binding and CTP). 4th Revised Ed. ASIA PACIFIC BUSINESS PRESS Inc, 2019.
- [3] В. З. Маїк, *Технологія брошурувально-палітурних процесів*. Львів: Укр. акад. друкарства, 2011.
- [4] E. K. Opoku, A. K. Badu, and K. K. Edonu, "Effectiveness of total quality management on organisational performance: Case study of printing press in Kumasi, Ashanti Region, Ghana", *International Journal of Innovative Research and Development*, vol. 10 (10), 2021.
- [5] W. T. Sun, and Y. J. Lin, "Systematic review and discussion on final artwork of prepress design", in *Proc. 3rd Eurasian Conf. on Educational Innovation 2020 (ECEI 2020) Education and Awareness of Sustainability*, 2020, pp. 777-780.
- [6] G. Sheth, *Subjective Image Quality Assessment of Digitally Printed Images*. Rochester Institute of Technology, 2019.
- [7] S. T. Jokhanan Kristiyono, *KOMUNIKASI GRAFIS: Dilengkapi Panduan Teknis Desain Layout dengan Aplikasi Software Grafis InDesign*. Prenada Media, 2020.
- [8] A. F. Sofyan, and T. Hidayat, *Komputer Grafis: Image Editing, Graphic Design, dan Page Layout: Contoh Kasus dengan Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, dan Adobe InDesign*. Penerbit Andi, 2020.
- [9] V. Senkivskyy, I. Pikh, N. Senkivska, I. Hileta, O. Lytovchenko, and Y. Petyak,

"Forecasting assessment of printing process quality", in *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making: 2020 Int. Sci. Conf. Intellectual Systems of Decision-making and Problems of Computational Intelligence*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020, pp. 467-479.

- [10] L. Adascalita, and I. Colesnic, "Comparative aspects regarding the technical characteristics and the quality characteristics of the prints specific offset and digital printing methods", *Annals of the Academy of Romanian Scientists, Series on Engineering Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 60-72, 2020.
- [11] G. V. Folea, E. Bălan, and C. Mohora, "Considerations on quality assurance for flexographic print products", *Annals of the Academy of Romanian Scientists, Series on Engineering Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 33-47, 2020.
- [12] А. В. Кудряшова, "Модель пріоритетного впливу факторів на якість післядрукарських процесів", *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнар. наук.-техн. журн. Хмельницьк. нац. ун-ту*, № 1, с. 187-192, 2023.
- [13] D. Pamucar, and F. Ecer, "Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: The fuzzy full consistency method-FUCOM-F", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 18 (3), pp. 419-437, 2020.
- [14] A. O. Kinay, and B. T. Tezel, "Modification of the fuzzy analytic hierarchy process via different ranking methods", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 37 (1), pp. 336-364, 2022.
- [15] І. В. Піх, Б. В. Дурняк, В. М. Сеньківський, та Т. С. Голубник, *Інформаційні технології формування якості книжкових видань*: монографія. Львів: УАД, 2017.

#### **References**

- [1] V. M. Senkivskyy, and O. I. Osinchuk, "Classification of factors of prepress processes", *Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademii drukarstva]*, no. 1 (54), pp. 60-67, Lviv, 2017 [in Ukrainian].
- [2] Handbook on Printing Technology (Offset, Flexo, Gravure, Screen, Digital, 3D Printing with Book Binding and CTP). 4th Revised Ed. ASIA PACIFIC BUSINESS PRESS Inc, 2019.

- [3] V. Z. Mayik, *Technology of finishing and binding processes*. Lviv: Ukr. Academy of Printing, 2011 [in Ukrainian].
- [4] E. K. Opoku, A. K. Badu, and K. K. Edonu, "Effectiveness of total quality management on organisational performance: Case study of printing press in Kumasi, Ashanti Region, Ghana", *International Journal of Innovative Research and Development*, vol. 10 (10), 2021.
- [5] W. T. Sun, and Y. J. Lin, "Systematic review and discussion on final artwork of pre-press design", in *Proc. 3rd Eurasian Conf. on Educational Innovation 2020 (ECEI 2020) Education and Awareness of Sustainability*, 2020, pp. 777-780.
- [6] G. Sheth, *Subjective Image Quality Assessment of Digitally Printed Images*. Rochester Institute of Technology, 2019.
- [7] S. T. Jokhanan Kristiyono, *KOMUNIKASI GRAFIS: Dilengkapi Panduan Teknis Desain Layout dengan Aplikasi Software Grafis InDesign*. Prenada Media, 2020.
- [8] A. F. Sofyan, and T. Hidayat, *Komputer Grafis: Image Editing, Graphic Design, dan Page Layout: Contoh Kasus dengan Adobe Photoshop, Adobe Illustrator, dan Adobe InDesign*. Penerbit Andi, 2020.
- [9] V. Senkivskyy, I. Pikh, N. Senkivska, I. Hileta, O. Lytovchenko, and Y. Petyak, "Forecasting assessment of printing process quality", in *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making: 2020 Int. Sci. Conf. Intellectual Systems of Decision-making and Problems of Computational Intelligence*. Cham: Springer Int. Publishing, 2020, pp. 467-479.
- [10] L. Adascalita, and I. Colesnic, "Comparative aspects regarding the technical characteristics and the quality characteristics of the prints specific offset and digital printing methods", *Annals of the Academy of Romanian Scientists, Series on Engineering Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 60-72, 2020.
- [11] G. V. Folea, E. Bălan, and C. Mohora, "Considerations on quality assurance for flexographic print products", *Annals of the Academy of Romanian Scientists, Series on Engineering Sciences*, vol. 12, no. 1, pp. 33-47, 2020.
- [12] A. V. Kudriashova, "A model of the priority influence of factors on the quality of post-printing processes", *Measuring and Computing Devices in Technological Processes: Int. sci. and tech. j. of Khmelnytskyi National University*, no. 1, pp. 187-192, 2023 [in Ukrainian].
- [13] D. Pamucar, and F. Ecer, "Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: The fuzzy full consistency method—FUCOM-F", *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, vol. 18 (3), pp. 419-437, 2020.
- [14] A. O. Kinay, and B. T. Tezel, "Modification of the fuzzy analytic hierarchy process via different ranking methods", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 37 (1), pp. 336-364, 2022.
- [15] I. V. Pikh, B. V. Durnyak, V. M. Senkivskyy, and T. S. Holubnyk, *Information technologies of quality formation of book editions: monograph*. Lviv: Ukr. Academy of Printing, 2017 [in Ukrainian].

**A. V. Kudriashova**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor  
e-mail: kudriashovaaliona@gmail.com  
Ukrainian Academy of Printing  
Pid Holoskom st., 19, Lviv, 79020, Ukraine

## RANKING OF FACTORS INFLUENCING THE QUALITY OF IMPLEMENTATION OF POST-PRINTING PROCESSES

*This article examines the main factors influencing the quality of implementation of post-printing processing of book editions, and, therefore, the quality of the final product – the book. In particular, the formed set of factors containing the following components: production of brochures, binding, assembly, covering material, processing of book blocks, decoration, final processing, project, is analyzed. In order to single out the selected factors, the method of expert evaluation is used and practitioners-experts and representatives of the scientific community are involved. The main attention is*

*paid to the establishment and analysis of relationships between factors, which are conditionally divided into two categories: direct and indirect influences and direct and indirect dependencies. At the same time, direct influences and dependencies are understood as the reachabilities of the first order, and indirect ones are understood as the reachabilities of the second order. To study the relationships between the factors, the ranking method is used, according to which a system of hierarchical trees is constructed: hierarchical graphs of direct and indirect influences on the quality of implementation of post-printing processing of book editions; hierarchical graphs of direct and indirect dependencies of factors for the implementation of post-printing processes. For mathematical assessment, each type of relationships is assigned a corresponding weight coefficient. Taking into account the number of relationships of a certain type for each factor and their weight coefficients, the integral weight values of the factors are determined. The result of the assessment is the establishment of factor ranks. At the same time, the highest rank is assigned to the factor with the largest final weight value. Accordingly, the higher the rank is, the more priority the influence of the analyzed factor has. For example, the factor of the eighth rank (which is the highest in this problem) is assigned the first priority level, that is, its influence on the quality of the studied technological process is decisive. Similarly, ranks and priority levels are assigned to all elements of the selected set.*

**Keywords:** *printing industry, book, bookbinding processes, hierarchy, rank, priority.*

[0000-0001-9724-8640] **Т. Е. Римар**, д-р техн. наук, доцент,  
професор кафедри хімічної інженерії та екології  
e-mail: rymartanyana1975@gmail.com

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля  
вул. Іоанна Павла II, 17, м. Київ, 01042, Україна

## ЗАСТОСУВАННЯ НВЧ УСТАНОВОК ДЛЯ СПУЧЕННЯ ЗЕРНИСТИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ РІДИННОГО СКЛА

*В роботі проводиться дослідження процесу отримання спучених зернистих матеріалів на основі рідинного скла під дією НВЧ випромінювання та порівняння його з процесом отримання цих матеріалів при традиційному конвективному нагріванні. Встановлено, що під дією НВЧ випромінювання за однакових температур з конвективним нагрівом вдвічі інтенсивніше відбувається спучення зернистого матеріалу. Так, при потужності 650 Вт ( $T = 115\text{--}120^{\circ}\text{C}$ ) коефіцієнт спучення досягає свого постійного значення 2,86 вже на 6-й хв процесу, тоді як при спученні зерен при конвективному нагріві за тієї самої температури найвище значення коефіцієнта спучення – 1,534 і досягається воно через 11 хв, що свідчить про складність спучення зерен за цих умов через перебіг конкуруючих процесів поризації та дегідратації. Прискорення процесу спучення і можливість його проведення за більш низьких температур пов'язані з тим, що під дією НВЧ випромінювання за рахунок збудження мікрохвильовим полем іонних потоків значно інтенсифікуються дифузійні процеси речовин з іонною провідністю, до яких відноситься рідинне скло. Для підтвердження ефективності використання НВЧ-установок було розраховано енергоспоживання і ККД установок та визначено, що ККД НВЧ установки майже вдвічі перевищує ККД сушарної установки. Наведено види промислових НВЧ-установок, в яких можна здійснити процес спучення рідинноскляних зерен.*

**Ключові слова:** зернисті матеріали, рідинне скло, НВЧ випромінювання, конвективний нагрів, коефіцієнт спучення, коефіцієнт корисної дії.

**Вступ.** Специфіка пористої структури (переважання закритої пористості зерен, наявність міжзернових порожнеч) сприяє забезпеченню не лише гарних теплотехнічних властивостей зернистих теплоізоляційних матеріалів (ТІМ), але й стабільності показників їх якості в цілому. Наявні дані про параметри їх якості свідчать про перспективність застосування зернистих ТІМ для виготовлення теплозахисних конструкцій.

У будівництві виготовляються і використовуються різноманітні штучні зернисті утеплювачі, як на основі природної сировини (перліту, вермікуліту, кремнезему), так і на основі силікатної сировини: алюмосилікатних матриць та рідинного скла, шляхом їх гранулювання з попереднім переведенням у гелеподібний стан за допомогою спеціальних добавок [1-9], які згодом спучують у різних теплових агрегатах – сушарних барабанах, тунельних печах і печах з киплячим шаром, вертикальних сушарних вібраційних установках тощо.

Найбільш інтенсивне спучення рідинноскляного бісеру відбувається в печах з киплячим шаром, проте при цьому із зерен інтенсивно видаляється волога, що негативно позначається на їх будівельно-експлуатаційних властивостях. Доцільніше використовувати для термообробки сирцевих гранул сушарні барабани, що обертаються. В них, за рахунок безперервної перевалки зерен у повітряному середовищі теплоносія, що подається, ефективніше здійснюється процес спучення бісеру [4], але сушарні барабани мають низьку продуктивність, а температура спучення зерен занадто висока.

Так, робота [5] присвячена розробці ресурсозберігаючої технології пористих зернистих матеріалів, що використовуються як заповнювачі пористих легких бетонів, з полімінеральних сировинних сумішей. У роботі встановлені закономірності термічного спучення склокристалічних гранул при використанні відходів магнітної сепарації скарново-магнетитових руд і буровугільних глин завдя-

ки наявності в них речовин, що виявляють термічну активність з виділенням газової фази. Розроблено склад формувальної суміші зі склобою, рідкого скла та багатокомпонентної добавки, що забезпечує поліпшення формувальних властивостей скломаси. Спінювання таких гранул відбувається за температури 750 °С.

Для отримання гранульованого матеріалу в роботі [6] запропоновані рідинноскляні суміші пластичної консистенції з переважанням алюмосилікатних мікросфер та золи-винесення. Розроблений гранульований матеріал отриманий випалом при температурі 250–350 °С.

В роботі [7] гранульований спінений матеріал отримують з вихідних матеріалів, що включають скляний порошок, рідинне скло, спінюючий агент і метаколін. Композицію змішують для утворення гомогенної суспензії. Далі суспензію гранулюють з утворенням необроблених частинок гранульованого матеріалу, які спінюють при температурі випалу від 780 °С до 950 °С.

Пропонований у роботі [8] склад шихти для гранул включає як основний компонент лужне скло, а для модифікації властивостей вводять: як пластифікатор – легкоплавку глину, газифікатор – кокс та органічні добавки (тирса). Температура випалу сирцевих гранул становить 830–850 °С.

В роботі [9] розроблено сировинну суміш кремнеземвмісного техногенного компонента – золи-віднесення теплових електростанцій – і спосіб виготовлення водостійких пористих теплоізоляційних матеріалів, що містить як сполучний компонент розчинне скло та піноутворювач і регулятор швидкості твердіння сировинної суміші. Запропоновано низькотемпературну технологію спінювання в барабанній печі при температурі 350–600 °С.

У цій роботі процес термообробки і спучення рідинноскляних зерен пропонується проводити у мікрохвильовій (МХ) установці, в якій значно інтенсифікуються дифузійні процеси, що дозволяє їх проводити впродовж значно меншого часу термообробки та за більш низьких температур.

Перші розробки промислових НВЧ установок для термообробки матеріалів будівельних конструкцій почалися ще в кінці 1980-х років. При усій різноманітності НВЧ електротермічних установок і технологічних

процесів, що реалізуються в них, усі ці установки мають ту саму структуру. За необхідності НВЧ установки додатково оснащують роликовою транспортною системою. Модульні конструкції НВЧ печей призначені для сушіння дерева, кераміки, хімічних речовин, продуктів харчування, будівельних матеріалів, загартування армованого волокна (склопластика), для попереднього нагріву каучуку.

За допомогою мікрохвильового нагріву проводяться такі важливі фізико-хімічні процеси, як дегідратація, розкладання солей і гідроксидів, синтез багатокомпонентних сполук і спікання кераміки, при цьому часові й енергетичні витрати істотно нижчі, ніж при використанні традиційних методів здійснення цих процесів. Більш того, у низці випадків за рахунок мікрохвильового впливу можна домогтися результатів, яких не можна досягти за допомогою інших методів [10].

Мікрохвильова обробка має ряд переваг перед звичайними методами нагріву конденсованих середовищ (твердих тіл і рідин), до яких належать висока швидкість і низька інерційність нагріву, відсутність контакту тіла, що нагрівається, і нагрівача, однорідність нагріву матеріалу за усім об'ємом, можливість вибіркового нагріву компонентів суміші і високий коефіцієнт корисної дії (ККД). До того ж, НВЧ енергія не вносить забруднень при нагріві, при її використанні відсутні будь-які продукти згоряння. Генераторне обладнання повністю електронне і працює практично безінерційно, завдяки чому рівень потужності НВЧ і момент її подачі можна миттєво змінювати [11]. Отже, здійснення термоспучення рідинноскляних зерен за допомогою надвисокочастотних струмів замість традиційного конвективного нагріву є високоперспективним, а легкість, з якою НВЧ енергія перетворюється на тепло, дозволяє отримати дуже великі швидкості нагріву.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є порівняння процесів спучення рідинноскляних зерен в різних умовах – при мікрохвильовому нагріві і традиційному конвективному нагріві за однакових температур та визначення найбільш ефективного виду нагріву. Відповідно до поставленої мети були вирішені такі задачі дослідження: визначення коефіцієнта спучення рідинноскляних зерен впродовж часу термообробки та ККД сушильної і НВЧ установок.

**Виклад основного матеріалу**

*Методологія процесу спучення.* Спученням називають процес збільшення об'єму зерен матеріалу при термообробці, що супроводжується утворенням високопористої внутрішньої структури з переважанням закритих пор. Пороутворювачем тут є вода (в основному силанольна і молекулярна, сильно пов'язана водневими зв'язками з немостикуваними атомами кисню). До початку термообробки в результаті взаємодії поверхні сирцевої рідинноскляної гранули з вуглекислим газом повітря утворюється шар більш щільного кремнегелю. При тепловій обробці нагрівання гранули за об'ємом відбувається нерівномірно. Зовні вона піддається більш значному впливу тепла. Поверхневий шар кремнегелю звільняється від поверхневої вологи, розм'якшується при температурі близько 100 °С і переходить в тонку еластичну малопористу оболонку. Під впливом надлишкового тиску еластична оболонка гранули подовжується, об'єм збільшується, і утворюється спучена гранула. На цьому самому етапі відбувається формування пористої структури рідинноскляної гранули [12].

*Термічні перетворення у рідинному склі.* Процеси спучення рідинноскляних зерен при традиційному конвективному нагріві відбуваються за температур 300–500 °С, що пов'язано з необхідністю перебігу полімеризаційних процесів гідросилікатів натрію. Їх термічні перетворення докладно розглянуті у роботі В. І. Корнєєва [13], де відзначено, що в основі кристалічних форм рідинного скла (РС) лежить ортокремнієва кислота  $\text{Si}(\text{OH})_4$ , яка існує у вигляді аморфного гідратованого кремнезему  $\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ . Відомі ортосилікати натрію всіх ступеней заміщення цієї чотирьохосновної кислоти. Кремнієва кислота може давати безліч полікремнієвих похідних за рахунок утворення силосанових зв'язків. Всі чотири ортосилікати натрію утворюють безліч кристалогідратів, до складу яких входить до восьми молекул води. Молекули води пов'язані водневими зв'язками з кремнієвими аніонами [14]. У системі  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  зі зростанням температури вміст води швидко зменшується і при 72 °С у рівновазі з розчином знаходиться безводний мета-силікат натрію. Зі зростанням температури розчинність усіх кристалогідратів підвищується, а метасилікату натрію – зменшується. Це відбувається, оскільки реакція утворення силосанових

зв'язків має достатньо велику енергію активації, і швидкість утворення полісилікатних іонів зі зростанням температури різко збільшується, що зменшує розчинність системи. Безводний метасилікат натрію відноситься до полі- або ланцюгових силікатів, на відміну від гідратних форм. Оскільки швидкість утворення силосанових зв'язків у сильно лужних системах при температурі, меншій за 100 °С, мала, безводний метасилікат натрію при температурі 70–100 °С отримати неможливо. При температурах 200–400 °С, крім метасилікатів, з'являються збагачені кремнеземом кристалічні структури. При цьому виникають умови для розвитку полімеризаційних процесів, і в системах з високим силікатним модулем утворюються кристали зі складним аніонним складом аж до кварцу. Видалення конституційної води зі структури РС супроводжується аніонною поліконденсацією, яка зазвичай називається полімеризацією. Так, двозаміщені ортосилікати при нагріванні перетворюються на  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  при 120 °С, однозаміщені ортосилікати натрію полімеризуються до  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  в діапазоні температур 100–300 °С. Тризаміщені ортосилікати спочатку розпадаються на дві фази  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{O}$ , а вище 400 °С утворюється бісилікат натрію  $2\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{Na}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_6\text{Si}_2\text{O}_7$  [13].

*Опис експериментальної установки.* Дослідження процесів спучення рідинноскляних зерен в умовах НВЧ випромінювання проводилося на лабораторній МХ установці, розробленій фахівцями ГНУ НТК «Інститут монокристалів» НАН України (м. Харків). Типовий мікрохвильовий прилад, який використовується для нагріву зразків, складається з чотирьох основних елементів: магнетрона, мікрохвильового резонатора, змішувача і хвилеводу. Мікрохвильове випромінювання генерується магнетроном, передається у робочий простір (резонатор) за допомогою хвилеводу, в якому змішувач розподіляє випромінювання, що надходить, у різних напрямках. Металевий корпус НВЧ-камери слугує для того, щоб направляти НВЧ випромінювання назад на матеріал так, що не буде втрачена НВЧ енергія і обслуговуючий персонал не буде піддаватися НВЧ випромінюванню [15].

Порівняно з побутовими мікрохвильовими печами, лабораторні варіанти забезпечують можливість контролю температури, тиску реакційної суміші та потужності випромінювання, вони створюють однорідне і стабільне

поле і мають системи перемішування. Це забезпечує можливість рівномірного нагрівання реакційних сумішей. Швидке нагрівання системи і швидке охолодження після закінчення процесу дозволяють контролювати час нагріву, що веде до отримання відтворюваних результатів.

**Методика експерименту.** Визначення коефіцієнта спучення проводилося стосовно кінцевого об'єму гранули до початкового:  $K = V_{кін}/V_{поч.}$  (об'єм гранули розраховували як об'єм кулі:  $V_{кулі} = 3/4\pi R^3$ ).

ККД процесу спучення визначався відповідно до розрахунку показників ефективності сушарних та НВЧ установок.

1) Сушарна установка [16].

Ступінь досконалості будь-якої теплової установки, зокрема і сушарної, оцінюється її енергетичним ККД, який являє собою відношення корисно використаної енергії (теплоти) до всієї витраченої.

ККД сушарної шафи розраховується за формулою

$$\eta = \frac{q_{кор.}}{q_{витр.}} \quad (1)$$

Для будь-якої сушарної установки корисно використаною теплою потрібно вважати тільки ту теплоту, яка витрачена на випаровування вологи з матеріалу. Ця теплота, віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді

$$q_{кор.} = r(x_2 - x_1), \quad (2)$$

де  $r$  – питома теплота пароутворення води;  
 $x_2$  – маса матеріалу до спучення;  
 $x_1$  – маса матеріалу після спучення.

Щодо витраченої теплоти, то для конвективних сушарок вона являє собою теплоту, сприйняту 1 кг газу в калорифері:

$$q_{витр.} = c_p(t_1 - t_0), \quad (3)$$

де  $c_p$  – теплоємність суміші.

2) НВЧ-установка [17].

Загальну витрату енергії на проведення процесу спучення розраховують за формулою

$$Q_{input} = P \cdot \tau, \quad (4)$$

де  $Q_{input}$  – енергія, що вводиться в систему, Дж;

$P$  – потужність установки;

$\tau$  – тривалість процесу.

Ефективність використання енергії розраховують за формулою

$$\eta = \frac{Q_{abs.}}{Q_{input}}, \quad (5)$$

де  $Q_{abs.}$  – теплота, яку необхідно повідомити системі для здійснення тих чи інших процесів:

$$Q_{abs.} = Q_{heat} + Q_{var}, \quad (6)$$

де  $Q_{var}$  – теплота випаровування води;

$Q_{heat}$  – кількість тепла, що витрачається на нагрів суміші до необхідної температури:

$$Q_{heat} = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (7)$$

де  $m$  – маса реакційної суміші;

$c$  – теплоємність суміші, кДж/кг·°С;

$\Delta T$  – різниця між кінцевою і початковою температурами реакційної суміші, °С.

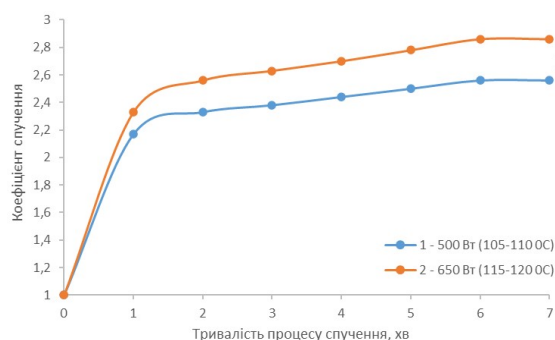
Для наочного порівняння ефективності роботи мікрохвильової і сушарної установок були проведені розрахунки їх енергоспоживання при тривалості роботи 5 хв.

### Результати досліджень

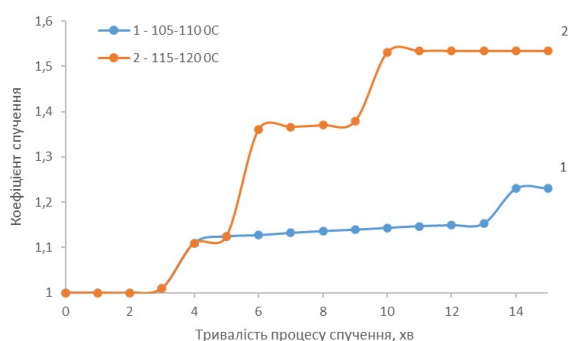
**Визначення коефіцієнта спучення рідинноскляних зерен.** Для порівняння процесу спучення рідинноскляних зерен при НВЧ і конвективному нагріві було визначено залежність коефіцієнта спучення від тривалості нагріву, яка наведена на рисунку 1.

З даних рисунка 1, а видно, що вже на першій хвилині коефіцієнт спучення ( $K$ ) сягає значень 2,17 і 2,33 відповідно при потужності випромінювання 650 і 500 Вт. На першому етапі відбувається видалення вільної й адсорбційної води і на графіку спостерігається швидке збільшення  $K$ . Найбільше значення коефіцієнта спучення має зернистий матеріал, отриманий під дією НВЧ випромінювання при потужності 650 Вт (відповідає  $T = 150\text{--}120^\circ\text{C}$ ), максимальний показник становить 2,86; досягається це значення через 6 хв нагріву. При потужності 500 Вт (відповідає  $T = 105\text{--}110^\circ\text{C}$ )  $K$  досягає свого постійного значення також на 6-й хв спучення і дорівнює воно 2,56, а при потужності 650 Вт цього значення  $K = 2,56$  сягає вже через 2 хв нагріву.

З рисунка 1, б видно, що у разі спучення зерен при конвективному нагріві за температур, однакових з МХ нагрівом, постійне значення  $K$  досягається на 14-й і 11-й хв спучення відповідно за температур 105–110 °С і 115–120 °С. Найвище значення  $K = 1,534$  має матеріал, який спучується при  $T = 115\text{--}120^\circ\text{C}$  протягом 11 хв, тоді як при температурі 105–110 °С  $K$  сягає значення лише 1,23. За низьких температур конвективного нагріву відбувається переважно сушіння матеріалу, що пов'язано з втратою як вільної, так і молекулярно зв'язаної води, це свідчить про перебіг конкуруючих процесів газовиділення та дегідратації.



а)



б)

**Рисунок 1. Залежність коефіцієнта спучення від тривалості процесу:**  
а) НВЧ нагрів, б) конвективний нагрів

Визначення енергоспоживання і ККД сушарної і НВЧ установок.

1) Сушарна установка.

Номинальна потужність сушарної шафи – 1100 Вт.

Корисно використана теплота становить

$$q_{\text{кор}} = r(x_2 - x_1) = 2204(1 - 0,92) = 176,32 \text{ кДж},$$

де  $x_2$  – маса матеріалу до спучення, приймаємо 1 кг;

$x_1$  – маса матеріалу після спучення.

Оскільки при спученні в сушарній шафі протягом 5 хв матеріал втрачає близько 8 % маси, то цей показник має значення 0,92 кг;

$r$  – питома теплота пароутворення. Для води при температурі 118 °C значення  $r$  становить 2204 кДж/кг (знайдено шляхом екстраполяції).

Витрачена теплота становить

$$q_{\text{випр}} = c_p(t_1 - t_0) = 4,12(118 - 20) = 403,76 \text{ кДж},$$

де  $c_p$  – теплоємність рідинноскляної суміші, розраховуємо як суму теплоємностей компонентів з огляду на їх питомий вміст – теплоємність рідинного скла розрахована і

становить 4,186 кДж/кг °C, теплоємність оксиду цинку – 0,0495 кДж/кг °C.

Звідси  $c_p = 4,186 \cdot 0,985 + 0,0495 \cdot 0,015 = 4,12 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{C}$ ;

$t_0$  – температура навколишнього середовища,  $20 \pm 2$  °C;

$t_1$  – температура всередині сушарної шафи, 118 °C.

$$\text{Тоді } \eta = \frac{q_{\text{кор}}}{q_{\text{випр}}} = \frac{176,32}{403,76} = 0,44.$$

2) НВЧ-установка (потужність НВЧ випромінювання 650 Вт).

Енергія, що вводиться в систему:

$$Q_{\text{input}} = P \cdot \tau = 650 \cdot 5 = 3250 \text{ кДж}.$$

Кількість тепла, яка витрачається на нагрівання суміші до необхідної температури:

$$Q_{\text{hea}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 1 \cdot 4,12 \cdot 98 = 403,8 \text{ кДж}.$$

де  $m$  – маса суміші – 1 кг;

$c$  – теплоємність рідинноскляної суміші, яка знайдена вище і становить  $c_p = 4,12 \text{ кДж/кг } ^\circ\text{C}$ :

$$\Delta T = 118 - 20 = 98 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Теплота, яку необхідно витратити системі для здійснення процесу:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{heat}} + Q_{\text{var}} = 403,8 + 2204 = 2607,8 \text{ кДж},$$

де  $Q_{\text{var}}$  – теплота випаровування води. При потужності установки 650 Вт середня температура матеріалу становила 118 °C. Теплота випаровування води при цій температурі становить 2204 кДж/кг.

$$\text{Звідси } \eta = \frac{Q_{\text{abs}}}{Q_{\text{input}}} = \frac{2607,8}{3250} = 0,8.$$

Як видно з проведених розрахунків, за інших рівних умов, ККД НВЧ-установки перевищує ККД сушарної установки майже вдвічі, отже, спучення рідинноскляного зернистого матеріалу доцільно проводити під дією НВЧ випромінювання.

**Обговорення результатів.** Отримані вище дані дозволяють визначити ефективність обох видів нагріву.

Так, у разі конвективного нагріву має місце наявність індукційного періоду, де спочатку спучення взагалі не відбувається, оскільки відбувається повільний розігрів РС, а для спучення необхідно, щоб матеріал під час водовідокремлення знаходився в розм'якшеному, піропластичному стані, оскільки основною умовою, яка забезпечує спучення при термообробці, є суміщення в часі піропластичного стану матеріалу з найбільш інтенсивним газо-

виділенням. Піропластичні властивості лужних розчинних силікатів виявляються у температурному інтервалі 120–250 °С, що відповідає максимальному водовидаленню [18].

Під дією ж НВЧ випромінювання, можна припустити, що піропластичного стану РС набуває вже при 100 °С, за цієї температури відбувається і максимальне видалення води, оскільки РС має іонну провідність, а у речовин з іонною провідністю, за рахунок збудження МХ полем іонних токів, дифузійні процеси значно інтенсифікуються, на відміну від речовин діелектриків. Тому, на відміну від конвективного нагріву під дією НВЧ випромінювання, процес з самого початку йде з великою швидкістю.

Можливість нетеплової модифікації електромагнітним полем НВЧ випромінювання РС зводиться до підвищення енергії хаотичного теплового руху молекул води у рідинному склі, що сприяє його інтенсивній полімеризації за більш низьких температур, низькомолекулярні фракції при цьому стають менш дефектними з більш міцною поперечно-зшитою структурою, водночас у матеріалі не виникає руйнуючих термомеханічних напруг, що підвищує його міцність [19].

Ефективне спучення гідрогелю можливе лише за умови, що при визначеному водовмісті температура початку дегідратації перевищує температуру склування, і це співвідношення якісно зберігається під час дегідратації аж до повного зневоднення. Як відомо, підвищення ступеня полімеризації кремнекисневих аніонів у гідрогелі різко підвищує температуру склування і знижує температуру початку дегідратації (через перехід частини води з силанольної в молекулярну), що може зробити термічне спучення неможливим [13].

Слід зауважити, що зернистий матеріал на основі рідинного скла отримують при температурі 300–500 °С, тому спучення при конвективному нагріві за температур, що відповідають температурам процесу в мікрохвильовій установці, буде малоефективним.

Ефективність перебігу процесу спучення рідинноскляних зерен в НВЧ установці було підтверджено також шляхом визначення енергоспоживання і ККД сушарної та НВЧ установок і показано, що ККД НВЧ установки майже вдвічі перевищує ККД сушарної установки.

Нині існують промислові НВЧ установки різних моделей. Поряд із класичними камерними НВЧ печами у промисловості засто-

совуються безперервно працюючі сушарні та нагрівальні установки. Так, існують конвеєрні НВЧ установки, які застосовують переважно для процесів сушіння (рисунк 2). Вони складаються з великої кількості магнетронів і циліндричної МХ камери. Вологе повітря відсмоктують з печі за допомогою систем відкачування. Такі установки можуть бути застосовані для сушіння та спучення зернистого матеріалу [20].



Рисунок 2. Конвеєрна НВЧ-установка

Для сушіння та спучення зерен можуть бути також застосовані установки «Vermic», які використовуються для спучення вермікуліту [21] (рисунк 3).

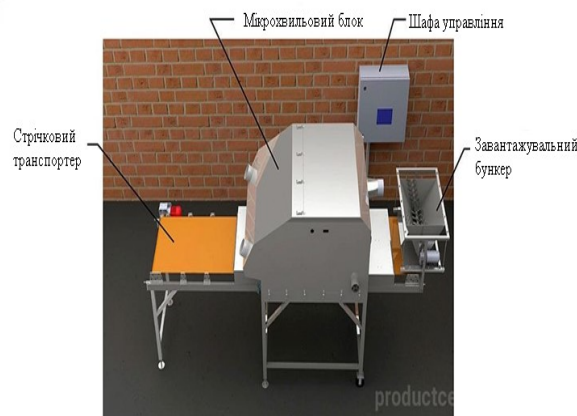


Рисунок 3. Установка «Vermic»

**Висновки.** Встановлено, що під дією НВЧ випромінювання за однакових температур з конвективним нагрівом вдвічі інтенсивніше відбувається спучення зернистого матеріалу. Так, при потужності 650 Вт ( $T = 115\text{--}120$  °С) коефіцієнт спучення досягає свого постійного значення 2,86 вже на 6-й хв процесу, тоді як при спученні зерен при конвективному нагріві, за тієї самої температури, найвище значення  $K = 1,534$ , і досягається воно

через 11 хв, що свідчить про складність спучення зерен за цих умов через перебіг конкуруючих процесів поризації та дегідратації.

Визначення енергоспоживання і ККД сушарної та НВЧ-установок доводять, що процес спучення під дією НВЧ випромінювання проводити набагато ефективніше, ніж при традиційному конвективному нагріванні. Так, ККД НВЧ установки майже в два рази перевищує ККД сушарної установки, які дорівнюють відповідно 0,8 і 0,44.

#### Список використаних джерел

- [1] A. Seco, J. M. del Castillo, C. Perlot, S. Marcelino, and S. Espuelas, "Recycled granulates manufacturing from spent refractory wastes and magnesium based binder", *Construction and Building Materials*, vol. 365, 130087, 2023.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130087/.
- [2] M. Li et al., "Energy-saving production of high value-added foamed glass ceramic from blast furnace slag and hazardous wastes containing heavy metal ions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, 135544, 2023.  
doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135544.
- [3] M. Shi, T.-C. Ling, B. Gan, and M. Guo, "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 178-184, 2019.  
doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021.
- [4] И. И. Юцис, *Новое технологическое оборудование для производства теплоизоляционных материалов*. Москва, Россия: Стройиздат, 1985.
- [5] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Foam glass crystalline granular material from a polymineral raw mix", *Crystals*, vol. 11(12), p. 1447, 2021.  
doi: 10.3390/cryst11121447.
- [6] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Porous fly ash/aluminosilicate microspheres-based composites containing lightweight granules using liquid glass as binder", *Polymers*, vol. 14 (17), p. 3461, 2022.  
doi: 10.3390/polym14173461.
- [7] A. S. Apkarian, L. A. Gomze, J.-E. F. M. Ibrahim, and S. N. Kulkov, "Sintering of silica-alumina granular materials and its catalytic properties", *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, vol. 73, no. 4, pp. 132-136, 2021.  
doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.19.
- [8] K. Weinberger, "Expanded-glass granular material and method for producing same", *WO2016124428A1. C03C11/007, Date pat. 11.08.2016*. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2016124428A1/en/>.
- [9] A. M. Pavlenko, and H. V. Koshlak, "Thermal insulation materials with porous structure", *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, no. 4, pp. 187-196, 2018.  
doi: 10.30540/sae-2018-025.
- [10] Qi Hu et al., "Microwave technology: A novel approach to the transformation of natural metabolites". *Chinese Medicine*, vol. 16, article no. 87, 2021.  
doi: 10.1186/s13020-021-00500-8.
- [11] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavroidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - a review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 34, pp. 75-90, 2002.  
doi: 10.1016/S0921-3449(01)00088-X.
- [12] А. И. Кудяков, Н. А. Свергунова, и М. Ю. Иванов, *Зернистый теплоизоляционный материал на основе модифицированной жидкостекольной композиции: монография / под ред. А. И. Кудякова*. Томск, Россия: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2010.
- [13] В. И. Корнеев, и В. В. Данилов, *Растворимое и жидкое стекло*. Санкт-Петербург, Россия: Стройиздат, 1996.
- [14] R. Iler, *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Itaka, N.Y., 1955.
- [15] C. Demitri et al., "Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing". *Interface Focus*, vol. 4, p. 20130053, 2014.
- [16] К. В. Луняка, Б. В. Димо, Н. Б. Андреева, та І. В. Калініченко, *Розрахунки з дисципліни "Теплотехнологічні процеси та установки"*: навч. посіб. Херсон, Україна: ХНТУ, 2018.
- [17] Н. А. Пинчукова, "Основы технологии получения кокарбоксылазы гидрохлорида с использованием микроволнового излучения": дис. канд. техн. наук: 05.17.04. Харьков, Украина, 2014.
- [18] В. Г. Гречанюк, *Фізична хімія і хімія силікатів: підручник*. Київ, Україна: Кондор, 2006.
- [19] Т. Е. Римар, "Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості грану-

- льованих теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла", *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, вип. 196, с. 6-16, Харків, 2021.
- [20] И. Именохоев, Х. Виндсхаймер, Р. Вайтц, Н. Кинтсель, и Х. Линн, "Технология СВЧ-нагрева: потенциал и границы". [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user\\_upload/pages/about\\_us/download/publications/white\\_papers/MikrowellenerwaermungRus.pdf](https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/MikrowellenerwaermungRus.pdf).
- [21] "Установки для вспучивания вермикулита VERMIC". [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tsc-technologies.ru/ru/oborudovanie/ustanovki-dlya-vspuchivaniya-vermikulita-vermic/>.
- ### References
- [1] A. Seco, J. M. del Castillo, C. Perlot, S. Marcelino, and S. Espuelas, "Recycled granulates manufacturing from spent refractory wastes and magnesium based binder", *Construction and Building Materials*, vol. 365, 130087, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130087/.
- [2] M. Li et al., "Energy-saving production of high value-added foamed glass ceramic from blast furnace slag and hazardous wastes containing heavy metal ions", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, 135544, 2023. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135544.
- [3] M. Shi, T.-C. Ling, B. Gan, and M. Guo, "Turning concrete waste powder into carbonated artificial aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 199, pp. 178-184, 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.021.
- [4] I. I. Yutsis, *New technological equipment for the production of thermal insulation materials*. Moscow, Russia: Stroizdat, 1985 [in Russian].
- [5] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Foam glass crystalline granular material from a polymineral raw mix", *Crystals*, vol. 11(12), p. 1447, 2021. doi: 10.3390/cryst11121447.
- [6] O. Miryuk, F. Fediuk, and M. Amran, "Porous fly ash/aluminosilicate microspheres-based composites containing lightweight granules using liquid glass as binder", *Polymers*, vol. 14 (17), p. 3461, 2022. doi: 10.3390/polym14173461.
- [7] A. S. Apkarian, L. A. Gomze, J.-E. F. M. Ibrahim, and S. N. Kulkov, "Sintering of silica-alumina granular materials and its catalytic properties", *Journal of Silicate Based and Composite Materials*, vol. 73, no. 4, pp. 132-136, 2021. doi: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2021.19.
- [8] K. Weinberger, "Expanded-glass granular material and method for producing same", *WO2016124428A1. C03C11/007, Date pat. 11.08.2016*. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/WO2016124428A1/en/>.
- [9] A. M. Pavlenko, and H. V. Koshlak, "Thermal insulation materials with porous structure", *Journal of New Technologies in Environmental Science*, vol. 2, no. 4, pp. 187-196, 2018. doi: 10.30540/sae-2018-025.
- [10] Qi Hu et al., "Microwave technology: A novel approach to the transformation of natural metabolites". *Chinese Medicine*, vol. 16, article no. 87, 2021. doi: 10.1186/s13020-021-00500-8.
- [11] D. A. Jones, T. P. Lelyveld, S. D. Mavrofidis, S. W. Kingman, and N. J. Miles, "Microwave heating applications in environmental engineering - a review", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 34, pp. 75-90, 2002. doi: 10.1016/S0921-3449(01)00088-X.
- [12] A. I. Kudyakov, N. A. Svergunova, and M. Yu. Ivanov, *Granular heat-insulating material based on a modified liquid glass composition: monograph*, A. I. Kudyakov, Ed. Tomsk, Russia: Izd-vo Tom. gos. arkhit-stroit. un-ta, 2010 [in Russian].
- [13] V. I. Korneev, and V. V. Danilov, *Soluble and liquid glass*. St-Petersburg, Russia: Stroizdat, 1996 [in Russian].
- [14] R. Iler, *The Colloid Chemistry of Silica and Silicates*. Itaka, N.Y., 1955.
- [15] C. Demitri et al., "Preparation and characterization of cellulose-based foams via microwave curing". *Interface Focus*, vol. 4, p. 20130053, 2014.
- [16] K. V. Luniaka, B. V. Dymo, N. B. Andrieieva, and I. V. Kalinichenko, *Calculations from the discipline "Heat-technological processes and installations": textbook*. Kherson, Ukraine: KhNTU, 2018 [in Ukrainian].
- [17] N. A. Pinchukova, "Fundamentals of technology for obtaining cocarboxylase hydro-

- chloride using microwave radiation": Ph.D. thesis: 05.17.04. Kharkov, Ukraine, 2014 [in Russian].
- [18] V. H. Hrechaniuk, *Physical chemistry and chemistry of silicates*: textbook. Kyiv, Ukraine: Kondor, 2006 [in Ukrainian].
- [19] T. E. Rymar, "Investigation of the influence of microwave radiation on the properties of granular heat-insulating materials based on liquid glass", *Zbirnyk naukovykh prats Ukr-DUZH*, iss. 196, pp. 6-16, Kharkiv, 2021 [in Ukrainian].
- [20] I. Imenokhov, H. Windsheimer, R. Weitz, N. Kintsel, and H. Lynn, "Microwave heating technology: potential and limits". [Online]. Available: [https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user\\_upload/pages/about\\_us/download/publications/white\\_papers/Mikrowelle\\_nerwaermungRus.pdf](https://www.linn-high-therm.de/fileadmin/user_upload/pages/about_us/download/publications/white_papers/Mikrowelle_nerwaermungRus.pdf) [in Russian].
- [21] "Installation for swelling vermiculite VERMIC". [Online]. Available: <http://tsc-technologies.ru/ru/oborudovanie/ustanovki-dlya-vspuchivaniya-vermikulita-vermic/> [in Russian].

**T. E. Rymar**, Dr. Tech. Sc., Associate Professor,  
Professor at the Department of Chemical Engineering and Ecology  
e-mail: rymartanyana1975@gmail.com  
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University  
Ioann Pavel II St., 17, Kyiv, 01042, Ukraine

## APPLICATION OF MICROWAVE INSTALLATIONS FOR SWELLING OF GRANULAR THERMAL INSULATION MATERIALS BASED ON LIQUID GLASS

*The paper studies the process of obtaining swelled granular materials based on liquid glass under the action of microwave radiation and compares it with the process of obtaining these materials with traditional convective heating. It has been established that under the action of microwave radiation at the same temperatures with convective heating, swelling of granular material occurs twice as intensively. Thus, at a power of 650 W ( $T=115-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), the swelling coefficient reaches its constant value of 2.86 already at the 6th minute of the process, while when grains swell during convective heating at the same temperature, the highest value of the swelling coefficient is 1.534, and it is reached after 11 minutes, which indicates the complexity of grain swelling under these conditions, due to the occurrence of competing processes of porization and dehydration. The acceleration of the swelling process and the possibility of carrying it out at lower temperatures are due to the fact that under the action of microwave radiation due to the excitation of ionic currents by the microwave field, diffusion processes of substances with ionic conductivity, which include liquid glass, are significantly intensified. The impossibility of carrying out the process at given temperatures during convective heating is explained by the fact that the main condition which ensures swelling during heat treatment is the coincidence in time of the pyroplastic state of the material with the most intense gas evolution. The pyroplastic properties of alkali soluble silicates are manifested in the temperature range of  $120-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which corresponds to the maximum water removal, that is, at the temperatures of  $115-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the process is just beginning. To confirm the effectiveness of the use of microwave installations, the energy consumption and efficiency ratio of the installations have been calculated and it is determined that the efficiency ratio of the microwave installation is almost twice the efficiency ratio of the drying installation. The paper also presents the types of industrial microwave installations in which it is possible to carry out the process of swelling of liquid glass grains.*

**Keywords:** granular materials, liquid glass, microwave radiation, convective heating, swelling coefficient, efficiency ratio.

УДК 614.841:536.46

[0000-0001-9082-0771] **Н. М. Козяр**, канд. техн. наук,  
e-mail: nazarkozyar@ukr.net

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України  
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ ЧИННИКІВ НА ШВИДКІСТЬ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНІ РЕЖИМИ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ З ДОБАВКАМИ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН

*Проведено експериментальні дослідження з визначення закономірностей впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів) і зовнішніх умов (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість і вибухонебезпечні режими горіння ущільнених сумішей із порошків металевих палив (магнію, алюмінію), нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію) та добавок органічних речовин, що використовуються у піротехнічному виробництві (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідиолу). В результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (температури нагріву, зовнішні тиски) для використовуваних на практиці діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача, відносного вмісту добавки органічних речовини, дисперсності металевих палив) на швидкість та режими горіння сумішей встановлено концентраційні межі горіння. За ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) добавки органічних речовин можна розташувати у такий ряд: ідиол > каніфоль > антрацен > уротропін > стеарин > метальдегід > нафталін > парафін. На практиці отримані результати досліджень можуть бути використані на стадії виготовлення зарядів сумішей шляхом регулювання природи та величини добавок органічних речовин для зменшення їх чутливості до можливих термічних дій.*

**Ключові слова:** пожежна безпека, піротехнічні суміші, процеси горіння, швидкість горіння, органічні речовини, металеві пали.

**Вступ.** З кожним роком в Україні та в усьому світі зростає кількість пожеж і вибухів в умовах зберігання, транспортування та застосування піротехнічних виробів на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей різного призначення (освітлювальних, сигнальних і трасувальних засобів, спалахувальних і запалювальних патронів та снарядів, ІЧ-виробів, елементів ракетно-космічної техніки та ін.) [2, 12]. Аналіз зазначених випадків показує, що загорянню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а також в умовах термоударних впливів при їх запусках та ін.). Це призводить до передчасного займання та розвитку горіння зарядів сумішей, що входять до складу виробів, та подальших вибухонебезпечних руйнувань виробів з утворенням високотемператур-

них (до 3000...4000 К) продуктів (конденсовані продукти згоряння, уламки металевих корпусів виробів та ін.), що є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (дерев'яні будови, паливно-мастильні матеріали, пускові установки з обслуговуючим персоналом та ін.). При цьому у багатьох випадках передчасні вибухонебезпечні спрацювання піротехнічних виробів мали катастрофічні наслідки, оскільки процес горіння піротехнічних зарядів, що почався, неможливо ефективно ліквідувати сучасними засобами пожежогасіння. Тому суттєвого практичного значення набуває запобігання можливим пожежовибухонебезпечним руйнуванням виробів у зазначених умовах. Для цього необхідно мати керовану базу даних зі швидкості розвитку горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, за допомогою якої можна оперативно визначати умови виникнення вибухонебезпечних режимів горіння сумішей при їх вимушеному спрацюванні.

Нині достатньо повно проведено дослідження процесів горіння двокомпонентних ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr, алюмінієво-магнієвих сплавів (ПАМ) та ін.) та нітратовмісних окиснювачів ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Sr(NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba(NO}_3)_2$  та ін.) за різних зовнішніх умов [1-3, 13-17]: встановлено діапазони зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра заряду суміші, матеріалу оболонки та ін.), в межах яких не спостерігається різкого збільшення швидкості горіння, а у низці випадків швидкість горіння може навіть зменшуватись, що стабілізує процес горіння сумішей, роблячи його більш стійким до зовнішніх термічних дій. Що стосується трьох та більше компонентних сумішей з технологічними добавками різних речовин, то сьогодні є лише кілька робіт [6, 7, 9] з впливу добавок органічних речовин на швидкість горіння двокомпонентних сумішей тільки за нормальних зовнішніх умов: встановлено перелік добавок, що зменшують швидкість і стабілізують процес горіння сумішей для різних значень їх технологічних параметрів; встановлено, що деякі добавки призводять до зростання швидкості горіння та роблять процес горіння більш чутливим до зовнішніх термічних дій. При цьому аналогічні дослідження з впливу низки практично важливих добавок органічних речовин (наприклад уротропіну, парафіну, стеарину, метальдегіду, каніфолі, ідитолу) на швидкість розвитку процесу горіння досліджуваних сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, притаманних термічним впливам, відсутні.

**Мета та задачі досліджень.** *Мета роботи:* отримання бази даних з визначення закономірностей впливу добавок органічних речовин, що використовуються у піротехнічному виробництві, у склад двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків металевих палих (магнію, алюмінію) та нітратовмісного окиснювача (нітрату натрію) на швидкість розвитку процесу їх горіння в умовах підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до  $10^7$  Па).

Задачами досліджень є:

- визначення закономірностей впливу добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі та ідитолу) у склад сумішей на залежності швидкості їх горіння від підвищених температур нагріву;

- визначення закономірностей впливу підвищених зовнішніх тисків на залежності швидкості горіння сумішей від вмісту у них зазначених добавок органічних речовин.

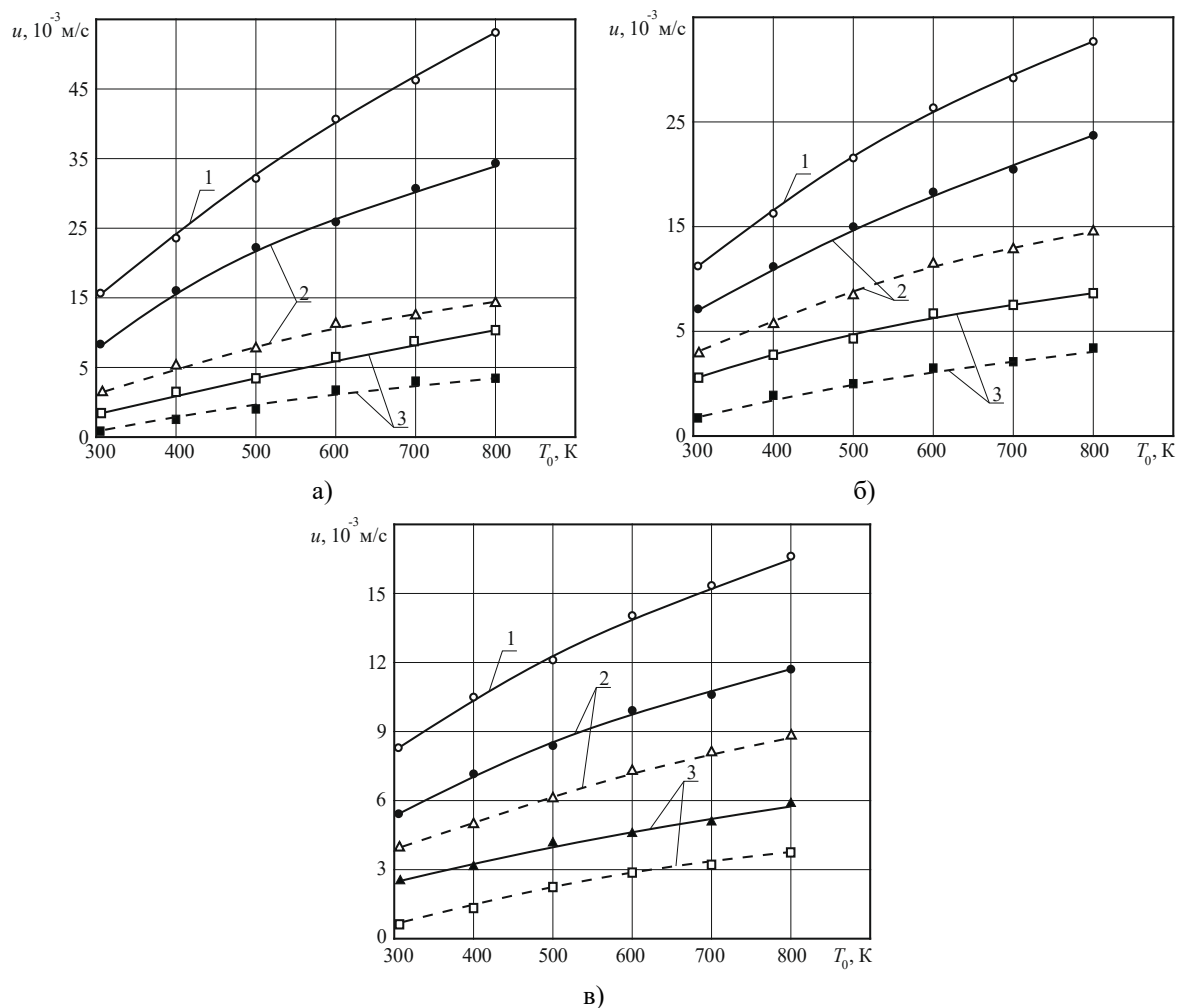
**Виклад основного матеріалу.** Зразки піротехнічних сумішей виготовлялись з використанням стандартних методів пресування порошків металевих палих (Mg, Al) та нітратовмісного окиснювача ( $\text{NaNO}_3$ ) з добавками органічних речовин (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі та ідитолу) [4, 5]. Для моделювання впливу основних параметрів зовнішніх термічних дій на вироби використовувалося стандартне піротехнічне обладнання, що дозволяє вимірювати швидкість розвитку горіння сумішей при підвищених температурах нагріву (до 800 К) і зовнішніх тисках (до  $10^7$  Па) [4, 6]. Середнє значення швидкості горіння сумішей визначалося за прийнятою у піротехніці формулою [7, 8]  $u = h/\tau$  ( $h$  – висота зразка, м;  $\tau$  – середній час згоряння зразка, с); при цьому відносна похибка вимірювання швидкості горіння сумішей не перевищувала 7...9 %. Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів [4]. Коефіцієнт ущільнення зразків сумішей становив  $K_u = 0,95...0,96$ , тобто зразки, які використовувались, мали гранично допустимі значення  $K_u$  та були фактично газонепроникними. Для дослідження впливу температури нагріву і зовнішнього тиску на швидкість горіння сумішей порошки компонентів запресовувались у металеві корпуси діаметром  $2 \cdot 10^{-2}$  м і товщиною оболонки  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м. Для забезпечення стійких режимів горіння зразків сумішей висота запресувань у зазначеному діаметрі становила  $3...4 \cdot 10^{-2}$  м.

В результаті проведених експериментальних досліджень для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , відносного вмісту органічних речовин  $\varepsilon$ , дисперсності (середнього розміру частинок порошків металевих палих  $d_m$  (мкм) та окиснювача  $d_{ок}$  (мкм)) компонентів) та зовнішніх чинників (температури нагріву  $T_0$  (К), зовнішнього тиску  $P$  (Па)) для сумішей були визначені їх концентраційні межі горіння  $\alpha_{ВМГ}$  та  $\alpha_{НМГ}$  ( $\alpha_{ВМГ}$  – верхня концентраційна межа горіння (максимально припустимий вміст металевих палих в суміші, при якому процес горіння ще має стійкий характер),  $\alpha_{НМГ}$  – нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст

окиснювача в суміші, при якому процес горіння ще не згасає)): для сумішей магній + нітрат натрію + органічна добавка –  $\alpha_{ВМГ} = 0,2...0,3$  та  $\alpha_{НМГ} = 3,0...3,2$ ; для сумішей алюміній + нітрат натрію + органічна добавка –  $\alpha_{ВМГ} = 0,25...0,35$  та  $\alpha_{НМГ} = 1,5...1,6$ .

**Результати досліджень.** З метою дослідження загального характеру поведінки залежностей  $u(T_0, P)$  для сумішей при

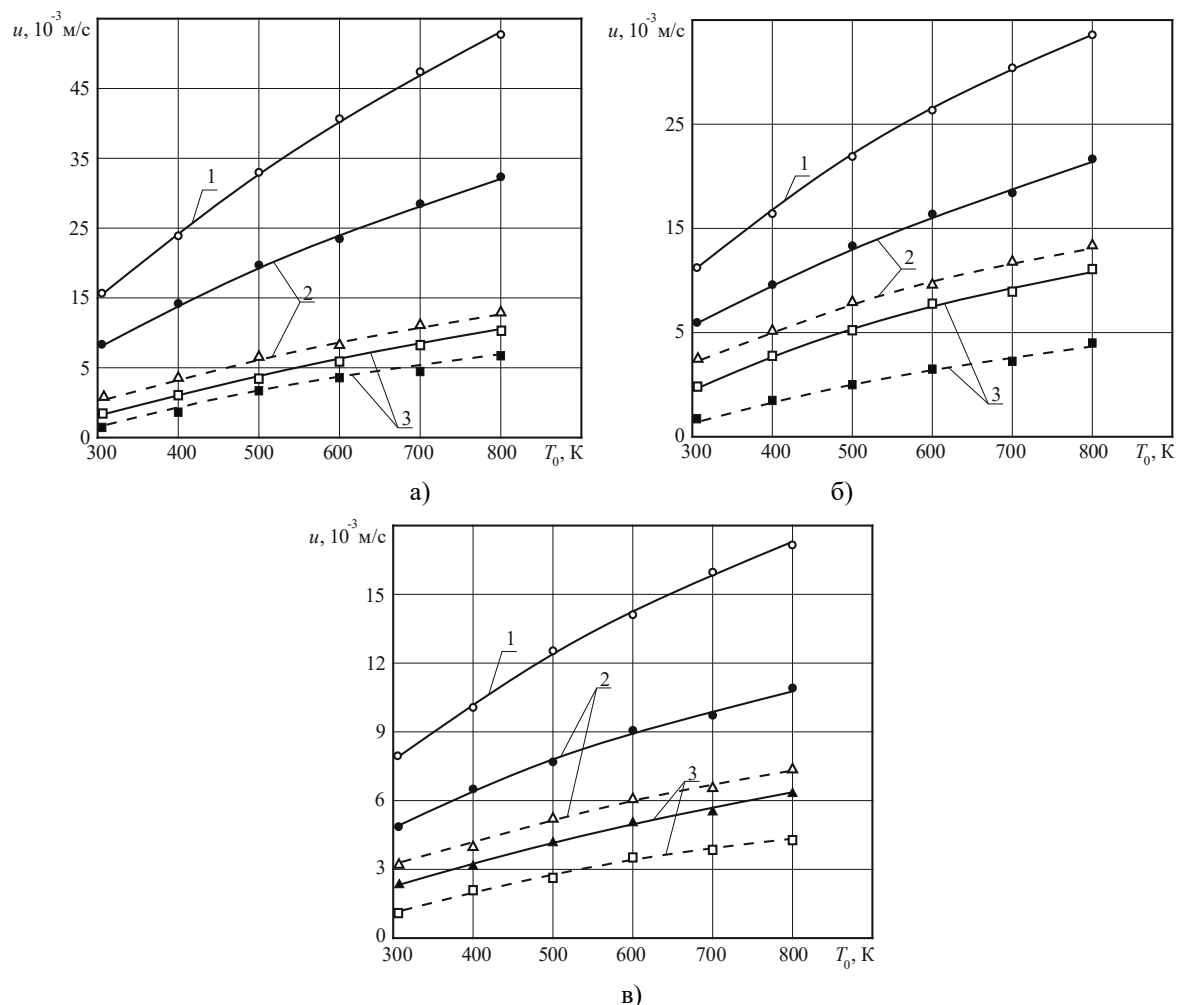
досліджуваних значеннях технологічних параметрів і зовнішніх чинників зазначені залежності досліджувалися в діапазоні зміни  $\alpha$ :  $\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$  (рисунки 1-9). Це було обумовлено тим, що на практиці суміші зі значеннями  $\alpha$ , які близькі до  $\alpha_{ВМГ}$  або  $\alpha_{НМГ}$ , не застосовують через їх явну нестабільність в умовах зовнішніх термодій.



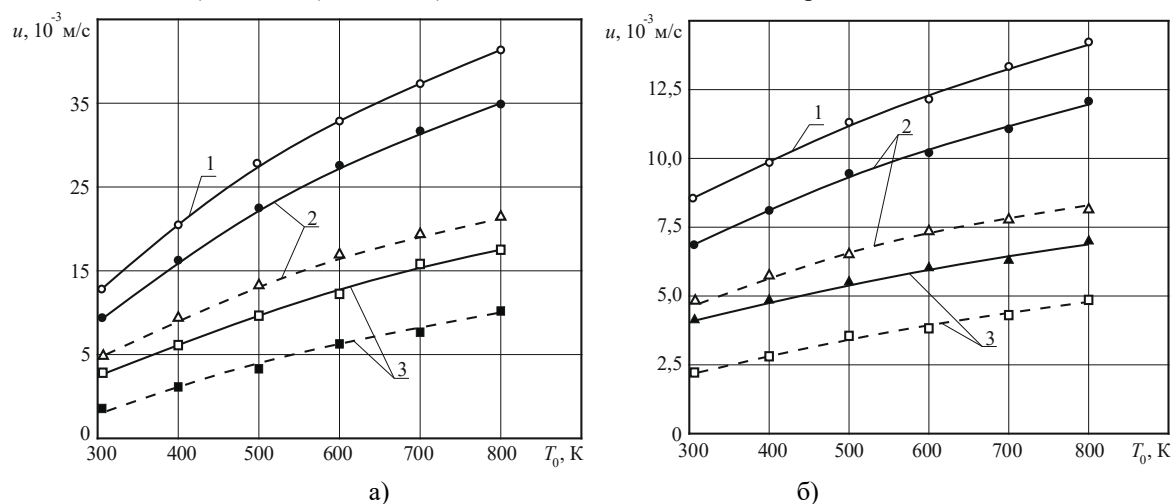
**Рисунок 1.** Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками парафіну (2) та стеарину (3) від температури нагріву ( $d_m = 74,5$  мкм,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — — —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - - -  $\varepsilon = 0,20$ ; а)  $\alpha = 0,5$ ; б)  $\alpha = 1,0$ ; в)  $\alpha = 1,6$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$  – експериментальні дані

**Обговорення результатів.** Для сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  + органічна добавка з даних, представлених на рисунках 1-5, випливає, що збільшення  $T_0$  від 293 К до 800 К призводить до зростання швидкості горіння в 1,7...3,8 разу; при цьому зі зростанням  $T_0$  залежність  $u(T_0)$  підсилюється в 1,3...1,6 разу. Крім цього, збільшення коефіцієнта надлишку окиснювача призводить до зменшення швидкості горіння та помітного послаблення залежності  $u(T_0)$ : зростання  $\alpha$  від 0,5 до 2,5 призводить до

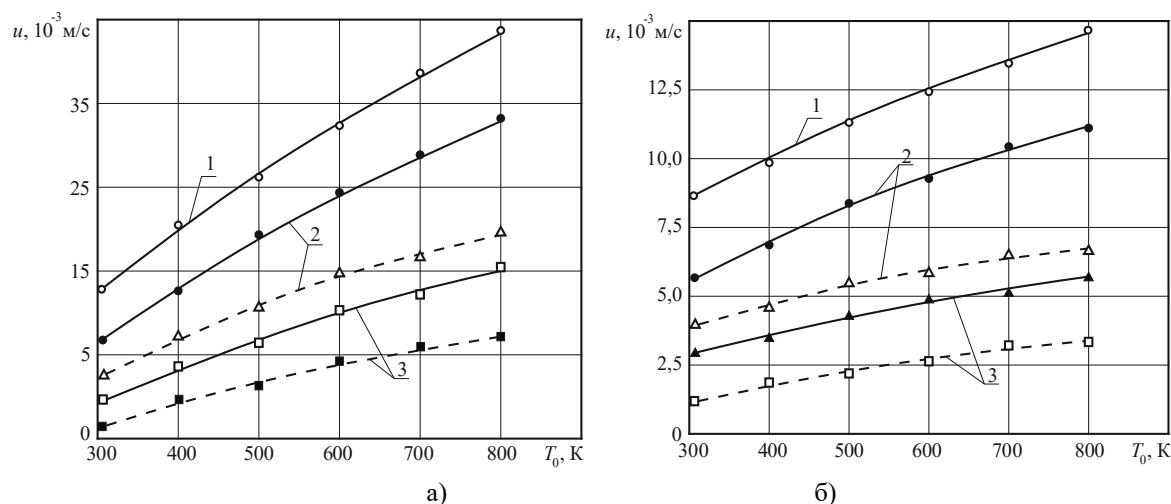
послаблення залежності  $u(T_0)$  у 2,1...2,3 разу. Зменшення дисперсності порошку металевого пального призводить до зростання швидкості горіння та зменшення величини швидкості горіння у 3,8...4,2 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$ : зменшення значень  $d_m$  від 305 мкм до 74,5 мкм призводить до збільшення швидкості горіння в 1,9...2,8 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,2...1,9 разу. Для дослідженого діапазону  $0,5 < \alpha < 2,5$  величина  $d_{ок}$  не впливає на залежність  $u(T_0)$ .



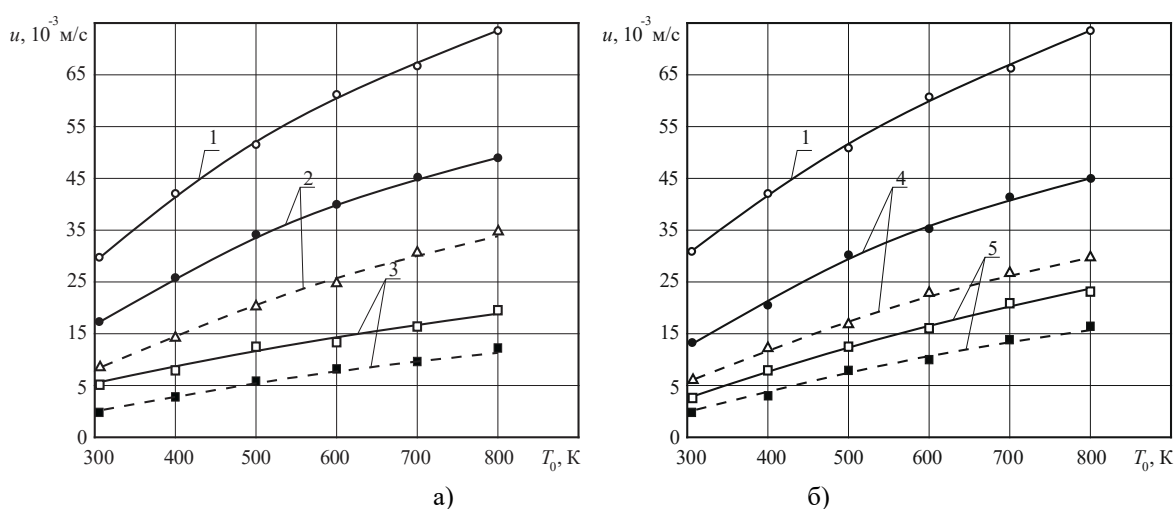
**Рисунок 2.** Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$  на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками уротропіну (2) та метальдегіду (3) від температури нагріву ( $d_M = 74,5$  мкм,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,02$ ; - - -  $\varepsilon = 0,10$ ;  
а)  $\alpha = 0,5$ ; б)  $\alpha = 1,0$ ; в)  $\alpha = 1,6$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$  – експериментальні дані



**Рисунок 3.** Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками нафталіну (2) та антрацену (3) від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - -  $\varepsilon = 0,20$ ;  
а)  $d_M = 74,5$  мкм; б)  $d_M = 182$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$  – експериментальні дані



**Рисунок 4.** Вплив дисперсності порошку металевого пального на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками каніфолі (2) та ідиолу (3) від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{\text{ок}} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,02$ ; - - -  $\varepsilon = 0,10$ ; а)  $d_m = 74,5$  мкм; б)  $d_m = 182$  мкм;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$  – експериментальні дані



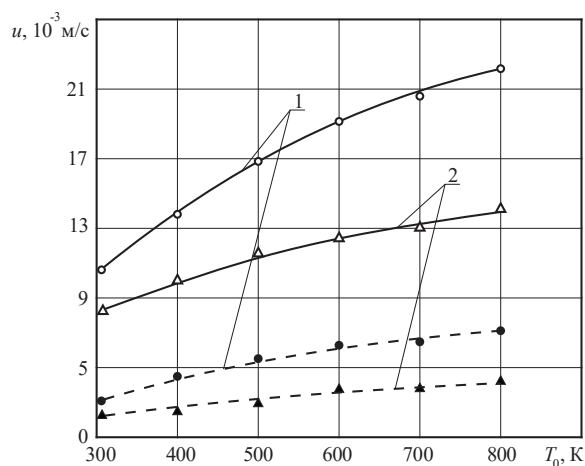
**Рисунок 5.** Вплив зовнішнього тиску на залежність швидкості горіння сумішей  $\text{Mg} + \text{NaNO}_3$  з добавками органічних речовин від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ;  $d_{\text{ок}} = 106$  мкм,  $d_m = 74,5$  мкм,  $P = 10^7$  Па): 1 – суміш без добавки; — —  $\varepsilon = 0,05$ ; - - -  $\varepsilon = 0,20$ ; а) суміш з добавками парафіну (2) та стеарину (3); б) суміш з добавками уротропіну (4) та метальдегіду (5);  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare, \square$  – експериментальні дані

Збільшення зовнішнього тиску призводить до значного зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для усіх досліджуваних діапазонів зміни  $\alpha$  та  $d_m$ ; зміна зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння у 2,7...3,1 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,8...2,3 разу. Введення в суміш добавок органічних речовин у кількості до  $\varepsilon = 0,20$  (для парафіну, стеарину, нафталану, антрацену) та  $\varepsilon = 0,10$  (для уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідиолу) призводить до значного змен-

шення швидкості і послаблення залежності  $u(T_0)$ : у 5,5 разу для добавки ідиолу, у 3,9 разу для добавки каніфолі, у 3,2 разу для добавки антрацену, у 2,7 разу для добавки уротропіну, в 1,9 разу для добавки стеарину, в 1,5 разу для добавки метальдегіду, в 1,3 разу для добавки нафталіну та в 1,2 разу для добавки парафіну, а також до послаблення залежності  $u(T_0)$  для усіх досліджуваних добавок – в 1,3...1,4 разу.

Для сумішей  $\text{Al} + \text{NaNO}_3$  + органічна добавка результати проведених досліджень

показують, що характер впливу коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності компонентів, зовнішнього тиску та величини добавки на залежність  $u(T_0)$  такий же, як і для досліджених вище сумішей. На рисунках 6-9 представлено експериментальні дані, які кількісно найбільш суттєво відрізняються від аналогічних даних для зазначених вище сумішей. З цих даних випливає, що при збільшенні  $T_0$  від 293 К до 800 К швидкість горіння зростає в 1,5...2,7 разу; при цьому вплив  $\alpha$  на характер залежності  $u(T_0)$  при зростанні  $T_0$  виявляється менш суттєвим (приблизно в 1,6...2,1 разу), ніж для попередніх сумішей. Зменшення дисперсності порошку металевго пального також призводить до зменшення швидкості горіння та послаблення залежності  $u(T_0)$ , але вже меншою мірою: збільшення значень  $d_m$  від 56 мкм до 306 мкм призводить до зменшення швидкості горіння у 2,3...2,5 разу та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,4...1,7 разу. Дисперсність окиснювача в межах досліджених діапазонів зміни величини  $\alpha$  також не впливає на залежність  $u(T_0)$ .



**Рисунок 7. Вплив добавок стеарину на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^7$  Па):**

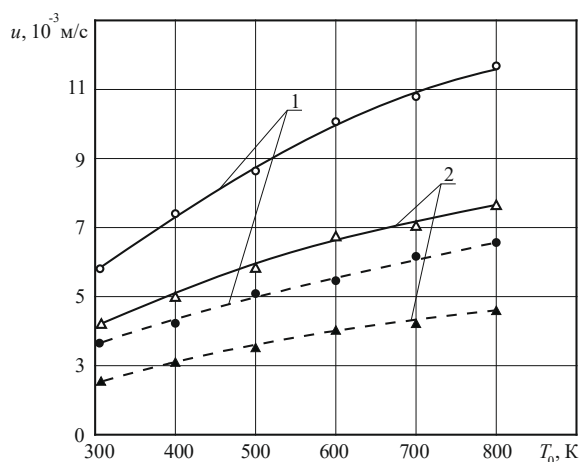
1 –  $d_m = 56$  мкм;

2 –  $d_m = 179$  мкм;

— суміш без добавки;

----  $\varepsilon = 0,10$ ;

○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 6. Вплив добавок парафіну на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па):**

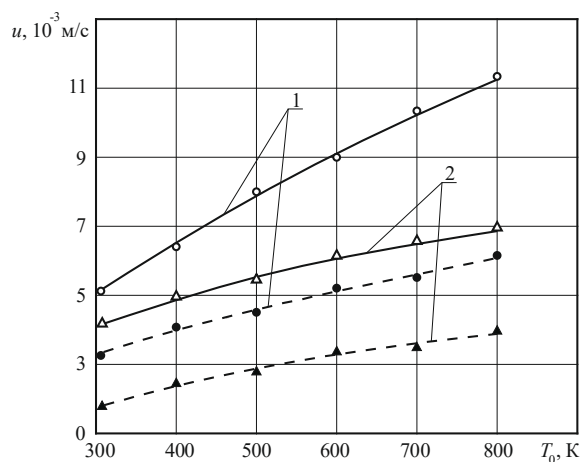
1 –  $d_m = 56$  мкм;

2 –  $d_m = 179$  мкм;

— суміш без добавки;

----  $\varepsilon = 0,20$ ;

○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 8. Вплив добавок уротропіну на залежність швидкості горіння сумішей Al + NaNO<sub>3</sub> від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^5$  Па):**

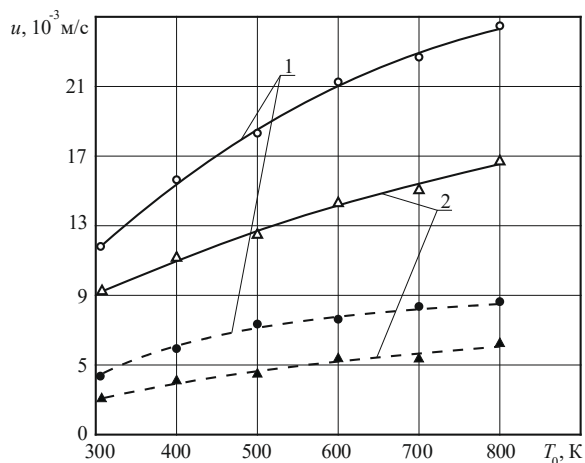
1 –  $d_m = 56$  мкм;

2 –  $d_m = 179$  мкм;

— суміш без добавки;

----  $\varepsilon = 0,10$ ;

○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 9.** Вплив добавок металевих домішок на залежність швидкості горіння сумішей  $Al + NaNO_3$  від температури нагріву ( $\alpha = 1,0$ ,  $d_{ок} = 106$  мкм,  $P = 10^7$  Па):

1 –  $d_m = 56$  мкм;

2 –  $d_m = 179$  мкм;

— суміш без добавок;

----  $\varepsilon = 0,10$ ;

○, ●, Δ, ▲ – експериментальні дані

Збільшення зовнішнього тиску призводить вже до меншого зростання швидкості горіння та підсилення залежності  $u(T_0)$  для досліджуваних значень  $\alpha$  та  $d_m$ : зростання зовнішнього тиску від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па призводить до збільшення швидкості горіння в 1,7...2,5 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...1,9 рази. Введення у суміш органічних добавок у кількості до  $\varepsilon = 0,20$  (для парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену) та  $\varepsilon = 0,10$  (для уротропіну, металевих домішок, каніфолі, ідиолу) призводить до зменшення швидкості горіння в 1,1...3,2 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,15...1,2 рази: наприклад, зростання величини добавки від  $\varepsilon = 0,05$  до  $\varepsilon = 0,20$  призводить до зниження швидкості горіння у 2,9 рази для добавки антрацену, в 1,7 рази для добавки стеарину, в 1,2 рази для добавки нафталіну та в 1,1 рази для добавки парафіну; зростання величини добавки від  $\varepsilon = 0,02$  до  $\varepsilon = 0,10$  призводить до зниження швидкості горіння у 5,2 рази для добавки ідиолу, у 3,4 рази для добавки каніфолі, у 2,5 рази для добавки уротропіну та в 1,3 рази для добавки металевих домішок.

Таким чином, за ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) добавки органічних речовин можна

розташувати у такий ряд: ідиол > каніфоль > антрацен > уротропін > стеарин > металевий домішок > нафталін > парафін.

На практиці отримані результати досліджень можуть бути використані на стадії виготовлення зарядів сумішей шляхом регулювання природи та величини добавок органічних речовин для зменшення їх чутливості до можливих термічних дій при зберіганні, транспортуванні та застосуванні піротехнічних виробів на їх основі.

#### Висновки:

1. В результаті проведених експериментальних досліджень впливу основних параметрів зовнішніх термодій (температури нагріву  $T_0$  – до 800 К, зовнішні тиски  $P$  – до  $10^7$  Па) для використовуваних на практиці діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , відносного вмісту добавки органічних речовин  $\varepsilon$ , дисперсності металевих пального  $d_m$  (мкм)) на швидкість та режими горіння сумішей встановлено концентраційні межі горіння ( $\alpha_{ВМГ}$  (верхня концентраційна межа горіння (максимально допустимий вміст металевих пального у суміші, при якому процес горіння ще має стійкий, не вибухонебезпечний характер)) та  $\alpha_{НМГ}$  (нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст окиснювача у суміші, при якому процес горіння ще стабільний без різкого затухання)): для сумішей  $Mg + NaNO_3 +$  органічна добавка  $\alpha_{ВМГ} = 0,2...0,3$  та  $\alpha_{НМГ} = 3,0...3,2$ ; для сумішей  $Al + NaNO_3 +$  органічна добавка  $\alpha_{ВМГ} = 0,25...0,35$  та  $\alpha_{НМГ} = 1,5...1,6$ .

2. Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що зростання  $T_0$  від 293 К до 800 К приводить до збільшення швидкості горіння сумішей в 1,5...3,8 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,3...1,6 рази; при цьому збільшення вмісту окиснювача від  $\alpha = 0,5$  до  $\alpha = 2,5$  призводить до зменшення швидкості горіння в 1,7...4,2 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...2,3 рази. Отримано, що зменшення середнього розміру частинок металевих пального призводить до збільшення швидкості горіння в 1,9...2,8 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,7...2,5 рази. Встановлено, що збільшення зовнішнього тиску призводить до зростання швидкості горіння в 1,8...3,1 рази та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,8...2,3 рази. Отримано, що введення у суміш добавок парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, ідиолу, каніфолі, уро-

тропіну та металдегіду у кількості  $\varepsilon = 0,02 \dots 0,20$  призводить до зменшення швидкості горіння в 1,2...5,5 рази та послаблення залежності  $u(T_0)$  в 1,15...1,4 рази.

3. З отриманих експериментальних даних випливає, що за ступенем зменшення швидкості та стабілізації процесу горіння в умовах зовнішніх термічних дій (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) піротехнічні нітратно-металізовані суміші можна розташувати у такі ряди залежно від природи металевих пального та добавки органічної речовини:  $Al + NaNO_3 + \text{органічна добавка} < Mg + NaNO_3 + \text{органічна добавка} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{парафін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{нафталін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{метальдегід} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{стеарин} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{уротропін} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{антрацен} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{каніфоль} < \text{металеве пальне} + NaNO_3 + \text{ідитол}$ .

**Перспективи подальших досліджень.** Надалі планується проведення досліджень з визначення закономірностей впливу параметрів зовнішніх термічних дій (підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків) на швидкість і вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин (фторидів металів ( $LiF$ ,  $NaF$ ,  $NiF_2$ ,  $BaF_2$ ,  $SiF_2$ ) та оксидів металів ( $CuO$ ,  $Cu_2O$ ,  $Sb_2O_3$ ,  $NiO$ )).

### Список використаних джерел

- [1] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр.*, вип. 19, с. 323-332, 2018.
- [2] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [3] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 56-67, 2019.
- [4] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [5] Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, та В. В. Цибулін, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згорання піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [6] Є. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металоксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація"*, т. 5, № 2, с. 37-51, 2021.
- [7] Є. П. Кириченко, В. В. Ковалишин, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- [8] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, та В. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [9] Є. Кириченко, "Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національ-*

ного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація", т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.

- [10] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацювання піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 122-130, 2022.
- [11] Є. П. Кириченко, "Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 53-63, 2022.
- [12] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ: Наук. думка, 2017.
- [13] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [14] "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом": звіт про наук.-досл. роботу. Київ: УкрНДІЦЗ, 2018.
- [15] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>
- [16] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Internauka*, № 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.inter-nauka.com>
- [17] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, та Р. Б. Мотрічук, "Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей", на *XI Міжнар. наук.-практ. конф.*

*Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси: Черкас. ін-т пожеж. безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2020.

## References

- [1] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, O. C. Baanovsky, and V. V. Tsybulin, "Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures", *Nauka ta vyrobnytstvo: interuniv. thematic coll. of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [2] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [3] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrychuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the influence of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products based on them", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [4] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1 (51), pp. 44-49, 2020.
- [5] R. B. Motrychuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Y. P. Kyrychenko, and V. V. Tsybulin, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [6] Ye. Kyrychenko, "Study of the processes of external thermal shock effects on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of a shot and flight", *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv*

- Chornobylyla Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [7] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozd, V. A. Vashchenko, S. O. Kolińko, and V. V. Tsybulin, "Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [8] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Dyadushenko, and V. Melnyk, "Patterns of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [9] Ye. Kyrychenko, "Investigation of ignition processes and the development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures made of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures", *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylyla Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychnyi sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].
- [10] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, and O. Dyadushenko, "Prevention of premature triggering of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium, aluminum powders and metal oxides under conditions of external thermal effects", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 122-130, 2022 [in Ukrainian].
- [11] Ye. P. Kyrychenko, "Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universitetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [12] V. M. Fateev, Yu. P. Prikhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv: Nauk. dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [13] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolińko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.
- [14] "Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis": report on research work. Kyiv: UkrNDICZ, 2018 [in Ukrainian].
- [15] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improvement of fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5799, 2020. [Online]. Available: <http://www.internauka.com> [in Ukrainian].
- [16] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium mixtures in the conditions of external thermal actions", *Internauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.internauka.com> [in Ukrainian].
- [17] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and practice of extinguishing fires and eliminating emergency situations*, Cherkasy: Cherkas. in-t pozhezh. bezpeky im. Heroyiv Chornobylyla, 2020 [in Ukrainian].

N. M. Kozyar, *Cand. Tech. Sc.*

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl  
of the National University of Civil Defense of Ukraine  
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

## REGULARITIES OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND EXTERNAL FACTORS ON THE SPEED AND EXPLOSIVELY UNSAFE COMBUSTION MODES OF PYROTECHNIC NITRATE-METALLIZED MIXTURES WITH ADDITIVES OF ORGANIC SUBSTANCES

*Prevention of possible fire-explosive destruction of products in the conditions of external thermal actions is of significant practical importance. For this, it is necessary to have a controlled database on the rate of development of combustion of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures, with the help of which it is possible to quickly determine the conditions for the occurrence of explosive modes of combustion of mixtures during their forced activation.*

*There are no studies on the effect of a number of practically important additives of organic substances (for example, urotropin, paraffin, stearin, metaldehyde, rosin, iditol) on the rate of development of the combustion process of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures inherent in thermal effects.*

*The purpose of the work is to obtain a database for determining the regularities of the influence of additives of organic substances used in pyrotechnic production in the composition of two-component pyrotechnic mixtures of metal fuel powders (magnesium, aluminum) and a nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate) on the rate of development of the process of their combustion under conditions of increased heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to  $10^7$  Pa).*

*Experimental studies have been conducted to determine the regularities of influence of technological parameters (ratio and dispersion of components) and external conditions (elevated heating temperatures and external pressures) on the speed and explosive modes of combustion of compacted mixtures of metal fuel powders (magnesium, aluminum), nitrate-containing oxidizer (sodium nitrate) and additives of organic substances used in pyrotechnic production (paraffin, stearin, naphthalene, anthracene, urotropine, metaldehyde, rosin, iditol). As a result of experimental studies of the influence of the main parameters of external thermal actions (heating temperatures, external pressures) for the ranges of changes in technological parameters used in practice (coefficient of excess oxidant, relative content of organic matter additive, dispersion of metallic fuel) on the rate and modes of combustion of mixtures, concentration limits of combustion are established. The conducted experimental studies make it possible to establish that an increase in  $T_0$  from 293 K to 800 K leads to an increase in the burning rate of mixtures by 1,5...3,8 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,3...1,6 times; an increase in the oxidant content from  $\alpha = 0,5$  to  $\alpha = 2,5$  leads to a decrease in the burning rate by 1,7...4,2 times and a weakening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,7...2,3 times; a decrease in the average size of metal fuel particles leads to an increase in the burning rate by 1,9...2,8 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,7...2,5 times; an increase in external pressure leads to an increase in the burning rate by 1,8...3,1 times and a strengthening of the  $u(T_0)$  dependence by 1,8...2,3 times. According to the degree of reduction in the speed and stabilization of the combustion process of mixtures under conditions of external thermal effects (increased heating temperatures and external pressures), additives of organic substances can be arranged in the following series: iditol > rosin > anthracene > urotropin > stearin > metaldehyde > naphthalene > paraffin. In practice, the obtained research results can be used at the stage of manufacturing of mixture charges by adjusting the nature and amount of organic substance additives to reduce their sensitivity to possible thermal effects.*

**Keywords:** fire safety, pyrotechnic mixtures, combustion processes, burning speed, organic substances, metallic fuels.

[0000-0002-5707-0419] **А. Г. Данилкович**<sup>1</sup>, д-р техн. наук, професор,  
e-mail: ag101@ukr.net

[0000-0001-6378-7718] **О. В. Сангінова**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент,  
[0000-0003-2963-4026] **А. М. Шахновський**<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент

<sup>1</sup> Київський національний університет технологій та дизайну  
вул. Мала Шияновська, 2, м. Київ, 01011, Україна

<sup>2</sup> Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського  
Берестейський пр-т, 37, м. Київ, 03056, Україна

## КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ГІДРОФОБІЗУЮЧОЇ КОМПОЗИЦІЇ

*В роботі представлені результати комп'ютерного моделювання та оптимізації складу гідрофобізуючої композиції на основі алкенів  $C_{20-24}$ , полімеризованих з малеїновим ангідридом. В результаті досліджень запропоновано оптимальний склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції, що містить естер  $C_{18-22}$  малеїнової кислоти, парафіни легких фракцій  $C_{5-7}$ , етилцелозольв, пропанол, воду, сечовину в такому співвідношенні інгредієнтів: 0,3163 : 0,0770 : 0,0663 : 0,0354 : 0,475 : 0,03. Зазначена композиція має покращувати структурно-визначальні характеристики природних полімерів, зокрема хутрового велюру, отриманого з напівтонкорунних овчин. Застосовано методи експериментально-статистичного моделювання та математичного програмування для знаходження оптимального складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції. Оптимізований склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції може бути ефективно використаний у технологіях виготовлення овчинно-шубних та шкіряних матеріалів підвищеної водостійкості. За комплексом властивостей отриманий гідрофобізований велюр придатний для виробництва нагольних виробів різного призначення, які експлуатуються в екстремальних умовах.*

**Ключові слова:** хутровий велюр, наповнення, гідрофобізація, планування експерименту, синтез плану експерименту, математична модель, багатокритеріальна оптимізація.

**Вступ.** У зв'язку з підвищенням вимог до експлуатаційних властивостей шкіряно-хутрових матеріалів задача розширення їх асортименту є однією з найважливіших проблем, що поставлені перед промисловим виробництвом. Ця задача вирішується шляхом удосконалення існуючих і розроблення інноваційних технологій з використанням нових хімічних реагентів та матеріалів. Значна роль у цих пошукових розробках належить при цьому ефективному використанню комп'ютерного моделювання й оптимізації складу композиції, зокрема захисного гідрофобізуючого призначення [1]. Зазначене вище є особливо важливим у зв'язку з багатостадійністю, високою матеріаломісткістю і техногенними особливостями шкіряно-хутрового виробництва [2]; важливе значення мають функціональність процесу і доступність інгредієнтів складу модифікуючої композиції. Дослідження у цьому напрямі залишаються актуальними, незважаючи на велику кількість запропонованих гідрофобізуючих складів композицій у шкіряно-хутровому виробництві.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про використання широкого асортименту реагентів і матеріалів різного хімічного складу, зокрема похідних жирних та оксикарбонових кислот, кремнійорганічних сполук твердих вуглеводнів у технології формування шкіряно-хутрових матеріалів та виробів. У роботі [3] досліджено серію полімерних композицій модифікованих полісилоксаном фторованих водорозчинних поліуретанових емульсій на основі гідроксипропілполідиметилсилоксану і політетраметиленафірдіолу. Встановлено високі гідрофобні та фізико-механічні показники шкіряного матеріалу і його стійкість до старіння. Підвищені експлуатаційні характеристики натуральних матеріалів шляхом надання шкірній тканині хутра стійкого водовідштовхувального ефекту та підвищеної міцності дозволяють також фторвмісні сполуки кремнію [4, 5]. Забезпечує структуруючий і захисний плівкоутворюючий ефект при формуванні шкіряних матеріалів застосування композиції на основі кремній-акрилатних полімерів [6], а при модифікації

кремнійорганічних сполук толуолом досягається підвищення водостійкості шкіряних матеріалів у динамічних умовах експлуатації [7].

Авторами [8] досліджено гідрофобізуючу дію фторвуглеводневих сполук після структуривання шкіряного напівфабрикату при використанні поліакриловотанідної композиції. Застосування на цій стадії гідрофобних поліакрилатів наведено у роботі [9]. При цьому найбільший гідрофобізуючий ефект, а також підвищення еластичності та міцності досягаються при довжині радикала, більшій ніж  $C_{16}$ . Відоме також застосування для підвищення водостійкості та брудовідштовхування шкіряних матеріалів поліфункціональних поліуретанів [10]; у цьому випадку, слід зазначити, спостерігається деяке підвищення твердості матеріалу.

Таким чином, у зв'язку з розширенням асортименту сировини зі специфічною структурою для виготовлення якісних натуральних матеріалів необхідне проведення досліджень у напрямі пошуку та розробки складу наповнювально-гідрофобізуючих композицій. Ефективне застосування багатокомпонентної гідрофобізуючої композиції потребує системного підходу до розробки її складу в умовах обмежень концентрації інгредієнтів суміші.

**Мета та задачі дослідження.** Метою цього дослідження є встановлення оптимального складу гідрофобізуючої композиції на основі алкенмалеїнового полімеризату для хутрового велюру методом комп'ютерного моделювання та оптимізації.

План досліджень передбачав такі етапи:

1. Визначення умов проведення експериментів – вибір об'єктів, устаткування, способів реалізації експерименту.

2. Підготовка плану експерименту, що забезпечував би отримання найбільш повної інформації про об'єкт дослідження при реалізації заданої обмеженої кількості дослідів.

3. Параметрична ідентифікація математичних моделей «склад композиції–властивості хутрового велюру» на основі експериментальних даних; експериментально-статистичну перевірку зазначених моделей;

4. Побудова комп'ютерної моделі та оптимізація складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції з використанням методів багатокритеріальної оптимізації.

### Виклад основного матеріалу

**I. Вихідні дані: об'єкт досліджень та умови проведення експериментів.** У цій

роботі об'єктом дослідження є хутровий велюр, вироблений із напівтонкорунної овчини степової [11] мокросолоного консервування за технологією [12]. Отримані хутрові овчини мали товщину шкіряної тканини 1,0–1,1 мм. Досліджувались зразки, отримані з центральної топографічної ділянки однієї овчини.

Відповідно до результатів попередніх досліджень для гідрофобізації зразків хутрового велюру використовується композиція, що включає такі інгредієнти:  $\alpha$ -алкени  $C_{20-24}$ , полімеризовані з малеїновим ангідридом, парафіни легких фракцій  $C_{5-7}$ , етилцелозоль, пропанол, сечовину, воду (з масовими частками у композиції відповідно  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  та  $X_6$ ).

Склад досліджуваної гідрофобізуючої композиції (8 % концентрації) наноситься на шкіряну тканину зразків шляхом розпилення з розрахунку 60 мл/м<sup>2</sup>. Зразки після підсушування до вологості 23–26 % піддаються обробленню розчином алюмокалієвих галунів концентрацією 100 г/дм<sup>3</sup> при витраті 20 мл/м<sup>2</sup>, потім знову підсушуються до вологості 14–16 %.

Контрольні зразки на стадії дублення-жирування обробляються електролітостійкою жирувальною емульсією *Lipoderm Liquor-2* фірми «BASF» (Німеччина) при витраті 3 г/дм<sup>3</sup>.

Критерії якості композиції, що оптимізується, визначалися наступними фізико-механічними характеристиками хутрового виробу, отриманими за результатами фізико-хімічних випробувань зразків хутрового велюру відповідно до методик [13] за нормальних умов після стандартизації. За критерії якості було обрано такі характеристики: динамічну водопроникність, хв ( $y_1$ ); подовження повне для окремих овчин при напрузі 9,8 МПа, % ( $y_2$ ); подовження повне при розриві, % ( $y_3$ ).

Значення показника  $y_1$  визначали на приладі ПВД-2 за швидкості деформування 24 хв<sup>-1</sup>. Деформуючу здатність зразків  $y_2$  і  $y_3$  визначали на розривній машині РТ-250М при швидкості руху нижнього затиску 80 мм/хв.

За результатами попередніх експериментів було з'ясовано, що зміна факторів  $X_5$  та  $X_6$  впливає на гідрофобні властивості композиції незначно, тому було прийнято рішення про фіксування у подальших дослідженнях зазначених факторів на оптимальному рівні, відповідному патентованому складу [14]:  $X_5 = 0,475$ ,  $X_6 = 0,03$  мас. часток.

## II. Побудова плану експериментів, методика та загальна схема експериментів.

Для ідентифікації математичного опису досліджуваної гідрофобізуючої композиції програма досліджень передбачала проведення активного експерименту за заздалегідь побудованим планом, що забезпечував би максимальне вилучення інформації з проведених дослідів.

Для постановки експерименту було обрано симплекс-решітчастий план «склад-властивість» [15]. Суттєво ускладнювала планування експерименту в цьому випадку необхідність врахування додаткових вимог, насамперед, щодо наявності в усіх пропонованих рецептурах повного складу вихідних інгредієнтів, а також щодо мінімального обсягу еліпсоїда розсіювання оцінок коефіцієнтів шуканої моделі складу композиції тощо. Методи синтезу планів експерименту, враховуючи інтервальні обмеження складу окремих компонентів суміші, є темою окремого напрямку досліджень: від математичної постановки проблеми синтезу планів експерименту «склад-властивість» з огляду на обмеження [16] до формулювання ефективних критеріїв оптимальності задач синтезу [17, 18] і вибору ефективних чисельних методів розв'язання задач оптимізації на основі зазначених критеріїв [19]. У представленому дослідженні для проведення експериментів було синтезовано спеціальний  $D$ -оптимальний план за процедурою, яка включала такі етапи [20]:

1. Визначення (на основі попередніх досліджень) «дозволеної області» факторного простору, тобто інтервальних обмежень на кожен із факторів.

2. Генерування у «дозволеній області» множини  $N$  теоретичних «точок-кандидатів» для майбутнього плану експерименту з використанням алгоритму Макліна-Андерсона [21] на основі максимального взаємного віддалення точок (одна від одної та від центру плану).

3. Власне синтез плану шляхом відбирання  $n$  кращих точок плану експериментів за критерієм  $D$ -оптимальності (1), тобто мінімального обсягу еліпсоїда розсіювання оцінок коефіцієнтів моделі, шляхом перебору всіх можливих комбінацій точок-кандидатів:

$$\det|D| \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $D = (F^T \cdot F)^{-1}$  – дисперсійна матриця підмножини точок-кандидатів на цій ітерації

синтезу плану експерименту;  $F$  – матриця плану експерименту розмірністю  $n \times t$ ;  $t$  – кількість коефіцієнтів експериментально-статистичної моделі – математичного опису досліджуваної гідрофобізуючої композиції.

Процедура синтезу плану вимагає значних витрат обчислювальних ресурсів: для відбору  $n$  найбільш бажаних варіантів складу композиції серед  $N$  точок-можливих кандидатів ( $n < N$ ) необхідно перевірити  $\tilde{n}_N^n$  комбінацій – поєднань з  $N$  по  $n$  точок:

$$\tilde{n}_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}. \quad (2)$$

Зокрема, для синтезу плану з чотирма незалежними змінними, що містить 10 експериментальних точок-дослідів ( $n = 10$ ), як випливає з (2), необхідно перебрати більш ніж  $10^9$  різних комбінацій. Враховуючи наведені міркування, під час комп'ютерної реалізації описаної вище процедури синтезу плану було застосовано алгоритми багатопотокових обчислень [22].

Необхідні для синтезу плану дослідження границі інтервальних обмежень, що визначають «дозволену область» симплексного експериментального простору, наведені в таблиці 1.

На основі описаної вище процедури з огляду на наявні обмеження (таблиця 1) було синтезовано  $D$ -оптимальний план в обмеженій ділянці симплексу (таблиця 2).

В результаті реалізації плану експерименту (таблиця 2) було отримано значення фізико-хімічних властивостей гідрофобізованого велюру: динамічну водопроникність, хв ( $y_1$ ); подовження повне для окремих овчин при нарузі 9,8 МПа, % ( $y_2$ ); подовження повне при розриві, % ( $y_3$ ) (таблиця 3).

Для експериментально-статистичної перевірки математичних моделей додатково були проведені експерименти в «контрольних точках» факторного простору. Результати реалізації двох паралельних дослідів у трьох довільно вибраних контрольних точках зпоміж точок-кандидатів подано в таблиці 4.

Очевидно, що при складанні композицій (таблиці 2–4) незмінно зберігалася балансова умова нормування їх складу:

$$\sum_{i=1}^k x_i = 1, \quad (3)$$

де  $k=6$  – кількість інгредієнтів у гідрофобізуючій композиції.

Таблиця 1. Априорні дані щодо складу наповнювально-гідрофобізуючої композиції

| Номер фактора | Границі інтервальних обмежень на частку інгредієнтів у композиції |       |                         |        |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------|--------|
|               | Натуральні значення $X_i$                                         |       | Кодовані значення $x_i$ |        |
|               | $min$                                                             | $max$ | $min$                   | $max$  |
| 1             | 0,2                                                               | 0,4   | 0,339                   | 0,8889 |
| 2             | 0,08                                                              | 0,15  | 0,1356                  | 0,3333 |
| 3             | 0,02                                                              | 0,07  | 0,0339                  | 0,1556 |
| 4             | 0,02                                                              | 0,06  | 0,0339                  | 0,1333 |

Таблиця 2. План експерименту в «дозволеній області» симплексу

| Експериментальна точка $i$ | План в натуральних координатах |        |        |        |         |         | План у кодованих координатах |        |        |        |
|----------------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                            | $X_1$                          | $X_2$  | $X_3$  | $X_4$  | $X_5^*$ | $X_6^*$ | $x_1$                        | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$  |
| 1                          | 0,1870                         | 0,1650 | 0,0770 | 0,0660 | 0,03    | 0,475   | 0,3778                       | 0,3333 | 0,1556 | 0,1333 |
| 2                          | 0,2849                         | 0,0671 | 0,0770 | 0,0660 | 0,03    | 0,475   | 0,5755                       | 0,1356 | 0,1556 | 0,1333 |
| 3                          | 0,2473                         | 0,1650 | 0,0168 | 0,0660 | 0,03    | 0,475   | 0,4995                       | 0,3333 | 0,0339 | 0,1333 |
| 4                          | 0,2362                         | 0,1650 | 0,0770 | 0,0168 | 0,03    | 0,475   | 0,4772                       | 0,3333 | 0,1556 | 0,0339 |
| 5                          | 0,2965                         | 0,1650 | 0,0168 | 0,0168 | 0,03    | 0,475   | 0,5989                       | 0,3333 | 0,0339 | 0,0339 |
| 6                          | 0,3697                         | 0,0671 | 0,0168 | 0,0414 | 0,03    | 0,475   | 0,7469                       | 0,1356 | 0,0339 | 0,0836 |
| 7                          | 0,3642                         | 0,0671 | 0,0469 | 0,0168 | 0,03    | 0,475   | 0,7358                       | 0,1356 | 0,0948 | 0,0339 |
| 8                          | 0,2418                         | 0,1650 | 0,0469 | 0,0414 | 0,03    | 0,475   | 0,4884                       | 0,3333 | 0,0947 | 0,0836 |
| 9                          | 0,2606                         | 0,1160 | 0,0770 | 0,0414 | 0,03    | 0,475   | 0,5264                       | 0,2344 | 0,1556 | 0,0836 |
| 10                         | 0,2661                         | 0,1160 | 0,0469 | 0,0660 | 0,03    | 0,475   | 0,5375                       | 0,2344 | 0,0947 | 0,1333 |

Примітка. \*Значення факторів зафіксовано на заданому рівні (близькому до оптимального).

Таблиця 3. Реалізація плану експерименту

| Властивості гідрофобізованого велюру | Склад композиції (експериментальна точка $i$ ) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------------|------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                      | 1                                              | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| $y_1$                                | 2                                              | 19 | 27 | 5  | 3  | 29 | 17 | 21 | 24 | 28 |
| $y_2$                                | 23                                             | 48 | 45 | 27 | 19 | 41 | 48 | 39 | 36 | 44 |
| $y_3$                                | 34                                             | 59 | 61 | 36 | 31 | 63 | 47 | 58 | 53 | 65 |

Таблиця 4. Результати експериментів у «контрольних точках» факторного простору

| $j$ | Склад композиції |        |        |        | Властивості гідрофобізованого велюру |       |       |       |       |       |
|-----|------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | $x_1$            | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$  | $y_1$                                | $y_2$ | $y_3$ | $y_4$ | $y_5$ | $y_6$ |
| 1   | 0,5859           | 0,2323 | 0,0808 | 0,1010 | 32                                   | 35    | 46    | 44    | 66    | 68    |
| 2   | 0,5051           | 0,2020 | 0,1717 | 0,1212 | 13                                   | 15    | 30    | 27    | 47    | 45    |
| 3   | 0,6465           | 0,2323 | 0,0606 | 0,0606 | 20                                   | 23    | 33    | 31    | 54    | 53    |

### Результати досліджень

**І. Ідентифікація математичних моделей «склад композиції–властивості хутрового велюру».** Параметричну ідентифікацію математичних моделей «склад композиції–властивості хутрового велюру» на основі експериментальних даних проводили для нелінійної поліноміальної моделі, що відповідає плану експерименту (таблиця 2):

$$\hat{y}_i = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4, \quad (4)$$

де  $\hat{y}_i$  – прогнозне значення фізико-хімічного показника хутрового велюру,  $i = 1, 2, 3$ .

Розрахунки з параметричної ідентифікації та подальшої статистичної перевірки (ANOVA) математичних моделей виконувалися в статистичному пакеті Stat-SENS©. Коefіцієнти математичної моделі (4) визначалися шляхом апроксимації експериментальних даних (таблиця 3) методом найменших квадратів [15].

Як результат параметричної ідентифікації поліноміальні моделі фізико-

хімічних властивостей хутрового велюру експериментальних даних набувають залежно від складу композиції на основі вигляду:

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= -46.47146x_1 - 279.82405x_2 - 554.09111x_3 - 2508.68518x_4 + 431.23002x_1x_2 + \\ &+ 914.35423x_1x_3 + 3384.36154x_1x_4 + 921.44059x_2x_3 + 3698.06871x_2x_4 + 2066.75374x_3x_4; \\ \hat{y}_2 &= 16.48885x_1 + 277.20149x_2 - 1214.89544x_3 - 661.53056x_4 - 515.11024x_1x_2 + \\ &+ 2048.36036x_1x_3 + 1179.15509x_1x_4 + 696.14900x_2x_3 + 789.03444x_2x_4 + 747.55765x_3x_4; \\ \hat{y}_3 &= -23.22516x_1 + 38.55836x_2 - 1503.65672x_3 - 2585.02201x_4 - 39.57969x_1x_2 + \\ &+ 2163.60474x_1x_3 + 3839.64073x_1x_4 + 1696.75139x_2x_3 + 3066.87831x_2x_4 + 3357.95714x_3x_4.\end{aligned}\quad (5)$$

Для статистичного оцінювання адекватності моделей (5) було використано результати дослідів у контрольних точках (таблиця 4).

З отриманих результатів випливає, що математичні моделі «склад композиції–властивості хутрового велюру» (5) є адекватними і можуть бути використані для оптимізації гідрофобізуючої композиції при виготовленні хутрового велюру.

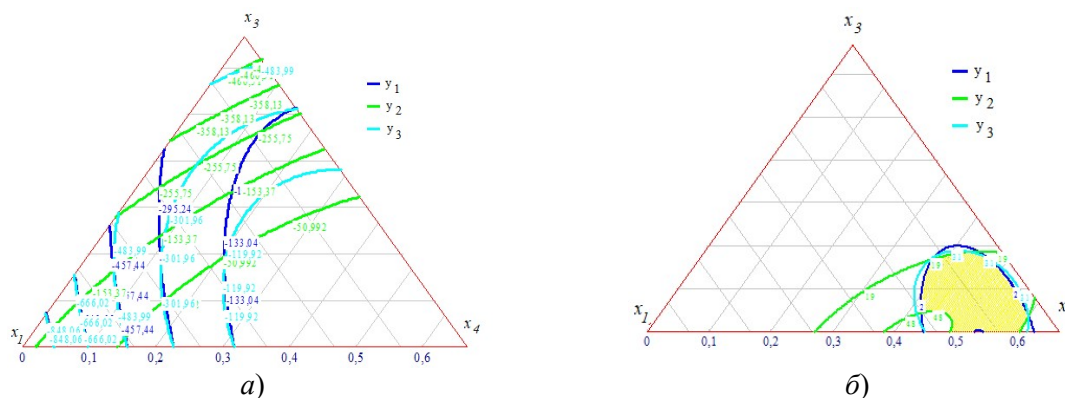
**II. Багатопараметрична оптимізація складу гідрофобізуючої композиції.** На етапі знаходження оптимального складу гідрофобізуючої композиції для обробки велюру були застосовані методи математичного програмування. Оптимізаційна модель була побудована на основі експериментально-статистичних моделей фізико-хімічних властивостей хутрового велюру (5) з огляду на технологічні обмеження (таблиця 1).

Реалізації математичної процедури багатопараметричної оптимізації передував аналіз графічних відгуків досліджуваної системи за рівняннями (5). Деякі характерні приклади

відгуків у пласкій симплексній системі координат представлено на рисунку 1.

Відомо, що пошук розв'язання цього класу оптимізаційних проблем – задач нелінійної умовної багатокритеріальної оптимізації – є неординарним обчислювальним завданням, що зумовлено необхідністю пошуку зони компромісу у факторному просторі всіх критеріїв оптимальності [23]. Проте аналіз графічних відгуків досліджуваної системи показав, що критерії оптимальності  $y_1, y_2, y_3$  для досліджуваної системи не є конфліктуючими. Тому для вирішення задачі багатоцільової оптимізації у цьому випадку виявився достатньо ефективним класичний метод мультиплікативної згортки.

З рисунка 1, а видно співпадіння «напрямів покращення» параметрів  $y_1, y_2, y_3$ , що характеризують властивості гідрофобізованого велюру, в бік компромісної області оптимуму (згадану компромісну область показано жовтою заливкою на рисунку 1, б).



**Рисунок 1. Проекції цільових поверхонь для досліджуваної системи моделей «склад композиції–властивості хутрового велюру» (фактор  $x_2$  зафіксовано на верхньому рівні): а) ізолінії відгуків; б) компромісна область**

Результати розв'язання задачі оптимізації складу гідрофобізуючої композиції методом мультиплікативної згортки представлено на рисунку 2. Тут і далі розрахунки виконувалися в електронних таблицях MS Excel із застосуванням надбудови «Пошук рішення» ("Solver").

© А. Г. Данилкович, О. В. Сангінова, А. М. Шахновський, 2023  
DOI: 10.24025/2306-4412.2.2023.277295

Оптимізація складу гідрофобізуючої композиції на основі поліноміальних моделей у кодованих координатах (5) методом мультиплікативної згортки [23] критеріїв  $y_1, y_2, y_3$  в електронних таблицях (рисунку 2) зводилася до підбору значення «цільових клітинок»

(тобто значень факторів  $x_1, x_2, x_3, x_4$ ), що забезпечували б оптимум загального критерію згортки  $Y_{opt}$  (у цьому випадку – рівнозваженого добутку критеріїв  $y_1, y_2, y_3$ ).

| Optimization by Multiplicative Convolution |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
|--------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| Coefficient Matrix                         |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| No                                         | bY <sub>1</sub> | bY <sub>2</sub> | bY <sub>3</sub> |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>1</sub>                             | -46,4715        | 16,48885        | -23,2252        | $\hat{y}_1 = -46,4715772x_1 - 279,8240468x_2 - 554,0911107x_3 - 2508,685176x_4 + 431,2300236x_1x_2 + 914,3542252x_1x_3 + 3384,361538x_1x_4 + 921,4405942x_2x_3 + 3698,068712x_2x_4 + 2066,753736x_3x_4$ |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>2</sub>                             | -279,824        | 277,2015        | 35,55836        | $\hat{y}_2 = 16,48884546x_1 + 277,2014921x_2 - 1214,895439x_3 - 661,5305618x_4 - 515,1102409x_1x_2 + 2048,360359x_1x_3 + 1179,155095x_1x_4 + 696,1490025x_2x_3 + 789,0344438x_2x_4 + 747,557646x_3x_4$  |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>3</sub>                             | -554,091        | -1214,9         | -1503,66        | $\hat{y}_3 = -23,22515583x_1 + 35,5583623x_2 - 1503,656724x_3 - 2585,022009x_4 - 39,57968659x_1x_2 + 2163,604735x_1x_3 + 3839,640728x_1x_4 + 1696,751838x_2x_3 + 3066,878306x_2x_4 + 3357,957135x_3x_4$ |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>4</sub>                             | -2508,69        | -661,531        | -2585,02        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>              | 431,23          | -515,11         | -39,5797        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>              | 914,3542        | 2048,36         | 2163,605        | Y <sub>1</sub> CALC=MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               |                               | x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> =A109*B109 |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>              | 3384,362        | 1179,155        | 3839,641        | Y <sub>1</sub> CALC=MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               |                               | ...                                      |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>              | 921,4406        | 696,149         | 1696,752        | Y <sub>1</sub> CALC=MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               |                               | Y <sub>OPT</sub> =(K109*L109*M109)^(1/3) |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>              | 3698,069        | 789,0344        | 3066,878        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>              | 2066,754        | 747,5576        | 3357,957        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| Optimization Factors                       |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          | Criteria values     |                     |                     | Convolution      |
| X <sub>1</sub>                             | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>                                                                                                                                                                           | X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>4</sub> | X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>            | Y <sub>1</sub> CALC | Y <sub>2</sub> CALC | Y <sub>3</sub> CALC | Y <sub>OPT</sub> |
| 0,6500                                     | 0,3040          | 0,0339          | 0,1333          | 0,1976                                                                                                                                                                                                  | 0,0220                        | 0,0866                        | 0,0103                        | 0,0405                        | 0,0045                                   | 98,80609            | 53,66168            | 129,6181            | 88,24794         |
| Interval Constraints on Factors            |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| X <sub>1</sub>                             | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | Borders                                                                                                                                                                                                 | SUM <sub>X</sub>              |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| 0,339                                      | 0,1356          | 0,0339          | 0,0339          | min                                                                                                                                                                                                     | 1,12116                       |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |
| 0,8889                                     | 0,3333          | 0,1556          | 0,1333          | max                                                                                                                                                                                                     | 1,1                           |                               |                               |                               |                                          |                     |                     |                     |                  |

Рисунок 2. Розв'язання задачі оптимізації складу гідрофобізуючої композиції методом згортки критеріїв

Ефективність методу мультиплікативної згортки показано порівнянням результатів оптимізації за цим методом із результатами вирішення тієї самої задачі методами ієрархічним, послідовних поступок та з використанням підходу на основі

функції бажаності [23, 24] (рисунки 3 і 4).

Хід і результати знаходження оптимального складу гідрофобізуючої композиції відповідно до методу послідовних поступок представлені на рисунку 3.

| Concession Method Optimization  |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Coefficient Matrix              |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| No                              | bY <sub>1</sub> | bY <sub>2</sub> | bY <sub>3</sub> |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>1</sub>                  | -46,4715        | 16,48885        | -23,2252        | $\hat{y}_1 = -46,4715772x_1 - 279,8240468x_2 - 554,0911107x_3 - 2508,685176x_4 + 431,2300236x_1x_2 + 914,3542252x_1x_3 + 3384,361538x_1x_4 + 921,4405942x_2x_3 + 3698,068712x_2x_4 + 2066,753736x_3x_4$ |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>2</sub>                  | -279,824        | 277,2015        | 35,55836        | $\hat{y}_2 = 16,48884546x_1 + 277,2014921x_2 - 1214,895439x_3 - 661,5305618x_4 - 515,1102409x_1x_2 + 2048,360359x_1x_3 + 1179,155095x_1x_4 + 696,1490025x_2x_3 + 789,0344438x_2x_4 + 747,557646x_3x_4$  |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>3</sub>                  | -554,091        | -1214,9         | -1503,66        | $\hat{y}_3 = -23,22515583x_1 + 35,5583623x_2 - 1503,656724x_3 - 2585,022009x_4 - 39,57968659x_1x_2 + 2163,604735x_1x_3 + 3839,640728x_1x_4 + 1696,751838x_2x_3 + 3066,878306x_2x_4 + 3357,957135x_3x_4$ |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>4</sub>                  | -2508,69        | -661,531        | -2585,02        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>   | 431,23          | -515,11         | -39,5797        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>   | 914,3542        | 2048,36         | 2163,605        | Y <sub>1 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                          |                               |                               |                               | x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> =A109*B109 |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>   | 3384,362        | 1179,155        | 3839,641        | Y <sub>1 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                          |                               |                               |                               | ...                                      |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>   | 921,4406        | 696,149         | 1696,752        | Y <sub>1 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                          |                               |                               |                               | x <sub>3</sub> x <sub>4</sub> =C109*D109 |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>   | 3698,069        | 789,0344        | 3066,878        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>   | 2066,754        | 747,5576        | 3357,957        |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| Optimization Factors            |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               | Criteria values     |                     |                     |
| X <sub>1</sub>                  | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>                                                                                                                                                                           | X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>            | X <sub>3</sub> X <sub>4</sub> | Y <sub>1 CALC</sub> | Y <sub>2 CALC</sub> | Y <sub>3 CALC</sub> |
| 0,6500                          | 0,3051          | 0,0339          | 0,1333          | 0,1983                                                                                                                                                                                                  | 0,0220                        | 0,0866                        | 0,0103                        | 0,0407                                   | 0,0045                        | 99,36899            | 53,72571            | 130,1174            |
| Interval Constraints on Factors |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| X <sub>1</sub>                  | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | Borders                                                                                                                                                                                                 | SUM <sub>X</sub>              |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| 0,339                           | 0,1356          | 0,0339          | 0,0339          | min                                                                                                                                                                                                     | 1,12224                       |                               | 0,9                           |                                          |                               |                     |                     |                     |
| 0,8889                          | 0,3333          | 0,1556          | 0,1333          | max                                                                                                                                                                                                     |                               |                               | 1,1                           |                                          |                               |                     |                     |                     |
| Concession Method Progress      |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         |                               |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
| Stage                           | Factors         |                 |                 |                                                                                                                                                                                                         | Criteria                      |                               |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |
|                                 | X <sub>1</sub>  | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>                                                                                                                                                                                          | Name                          | Value                         | Consession                    |                                          |                               |                     |                     |                     |
| 1                               | 0,6500          | 0,3049          | 0,0330          | 0,1331                                                                                                                                                                                                  | Y <sub>1</sub>                | 98,534                        | 78,827                        |                                          |                               |                     |                     |                     |
| 2                               | 0,6500          | 0,3051          | 0,0339          | 0,1332                                                                                                                                                                                                  | Y <sub>2</sub>                | 53,718                        | 42,974                        |                                          |                               |                     |                     |                     |
| 3                               | 0,6500          | 0,3051          | 0,0339          | 0,1333                                                                                                                                                                                                  | Y <sub>3</sub>                | 130,117                       |                               |                                          |                               |                     |                     |                     |

Рисунок 3. Розв'язання задачі оптимізації складу гідрофобізуючої композиції методом послідовних поступок

| Harrington Desirability Function Optimization  |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
|------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| Coefficient Matrix                             |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| No                                             | bY <sub>1</sub> | bY <sub>2</sub> | bY <sub>3</sub> |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub>                                 | -46,471458      | 16,48885        | -23,2252        | $\hat{Y}_1 = -46,47145772x_1 - 279,8240468x_2 - 554,0911107x_3 - 2508,685176x_4 + 431,2300236x_1x_2 + 914,3542252x_1x_3 + 3384,361538x_1x_4 + 921,4405942x_2x_3 + 3698,068712x_2x_4 + 2066,753736x_3x_4$ |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>2</sub>                                 | -279,82405      | 277,2015        | 35,55836        | $\hat{Y}_2 = 16,48884546x_1 + 277,2014921x_2 - 1214,895439x_3 - 661,5305618x_4 - 515,1102409x_1x_2 + 2048,360359x_1x_3 + 1179,155095x_1x_4 + 696,1490025x_2x_3 + 789,0344438x_2x_4 + 747,557646x_3x_4$   |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>3</sub>                                 | -554,09111      | -1214,9         | -1503,66        | $\hat{Y}_3 = -23,22515583x_1 + 35,5583623x_2 - 1503,656724x_3 - 2585,022009x_4 - 39,57968659x_1x_2 + 2163,604735x_1x_3 + 3839,640728x_1x_4 + 1696,751838x_2x_3 + 3066,878306x_2x_4 + 3357,957135x_3x_4$  |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>4</sub>                                 | -2508,6852      | -661,531        | -2585,02        |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>                  | 431,23002       | -515,11         | -39,5797        |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>                  | 914,35423       | 2048,36         | 2163,605        | Y <sub>1 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               | x <sub>1</sub> x <sub>2</sub> =A109*B109 |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>                  | 3384,3615       | 1179,155        | 3839,641        | Y <sub>2 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               | ...                                      |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>                  | 921,44059       | 696,149         | 1696,752        | Y <sub>3 CALC</sub> =MMULT(A109:J109;B97:B106)                                                                                                                                                           |                               |                               |                               | x <sub>3</sub> x <sub>4</sub> =C109*D109 |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>                  | 3698,0687       | 789,0344        | 3066,878        |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>                  | 2066,7537       | 747,5576        | 3357,957        |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |
| Optimization Factors                           |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               | Criteria values                    |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub>                                 | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>                                                                                                                                                                            | X <sub>1</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>1</sub> X <sub>4</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> | X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>            | X <sub>3</sub> X <sub>4</sub> | Y <sub>1 CALC</sub>                | Y <sub>2 CALC</sub> | Y <sub>3 CALC</sub> |                |
| 0,6500                                         | 0,3033          | 0,0339          | 0,1333          | 0,1971                                                                                                                                                                                                   | 0,0220                        | 0,0866                        | 0,0103                        | 0,0404                                   | 0,0045                        | 98,43209                           | 53,60832            | 129,2771            |                |
| Interval Constraints on Factors                |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               | Marks on the scale of desirability |                     |                     |                |
| X <sub>1</sub>                                 | X <sub>2</sub>  | X <sub>3</sub>  | X <sub>4</sub>  | Borders                                                                                                                                                                                                  | SUM <sub>X</sub>              |                               |                               |                                          |                               | Scale mark                         | Y <sub>1</sub>      | Y <sub>2</sub>      | Y <sub>3</sub> |
| 0,339                                          | 0,1356          | 0,0339          | 0,0339          | min                                                                                                                                                                                                      | 1,12046                       |                               | 0,9                           |                                          |                               | good                               | 35                  | 57                  | 78             |
| 0,8889                                         | 0,3333          | 0,1556          | 0,1333          | max                                                                                                                                                                                                      |                               |                               | 1,1                           |                                          |                               | bad                                | 30                  | 50                  | 69             |
| Coefficients of partial desirability functions |                 |                 |                 |                                                                                                                                                                                                          |                               |                               |                               |                                          |                               | Desirability values                |                     |                     |                |
| Coefficient                                    | Y <sub>1</sub>  | Y <sub>2</sub>  | Y <sub>3</sub>  | d <sub>1</sub> =EXP(-(EXP(-B119-B120*K109)))                                                                                                                                                             |                               |                               |                               | d <sub>1</sub>                           |                               |                                    | d <sub>2</sub>      | d <sub>3</sub>      | D              |
| a                                              | -12,331         | -14,583         | -15,613         | ...                                                                                                                                                                                                      |                               |                               |                               | 1,000                                    |                               |                                    | 0,559               | 1,000               | 0,823802       |
| b                                              | 0.39517         | 0.28213         | 0.21938         | D=(J118*K118*L118)^(1/3)                                                                                                                                                                                 |                               |                               |                               |                                          |                               |                                    |                     |                     |                |

Рисунок 4. Розв'язання задачі оптимізації складу гідрофобізуючої композиції з використанням узагальненої функції бажаності Харінгтона

Оптимізація складу досліджуваної композиції ієрархічним методом послідовних поступок (з величиною поступки 10 %) в електронних таблицях (рисунок 3) передбачала послідовне вирішення ланцюжка задач умовної однопараметричної оптимізації із включенням на поточній стадії до системи обмежень результатів оптимізації попередньої стадії, «послаблених» на величину поступки. Кількість стадій розрахунку (три) відповідає кількості критеріїв вихідної багатокритеріальної задачі.

Результати розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації на основі функції бажаності із застосуванням узагальненої функції бажаності представлено на рисунку 4. Як видно з рисунка 4, пошук розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації складу гідрофобізуючої композиції на основі функції бажаності на основі узагальненої функції бажаності Харрінгтона [24] проводився, враховуючи апріорно відомі величини «найгіршого» та «найкращого» значення вихідних змінних:  $y_1 - 30$  і  $35$ ,  $y_2 - 50$  і  $57$ ,  $y_3 - 69$  і  $78$ . Після розрахунку часткових критеріїв бажаності  $d_1$ ,  $d_2$ ,

$d_3$  оптимізація складу суміші зводилася до підбору значення «цільових клітинок», тобто значень факторів  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ , що забезпечували б оптимум узагальненого критерію бажаності  $D$ .

В усіх наведених вище випадках для цілей оптимізації використовувалося перемноження матриць  $bY_1$ ,  $bY_2$ ,  $bY_3$  коефіцієнтів цільових функцій та поточних значень факторів оптимізації  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $x_4$ . Роль допоміжного алгоритму для глобальної оптимізації складних багатоекстремальних цільових функцій (зокрема критерію згортки, узагальненого критерію бажаності) відіграв еволюційний алгоритм, реалізований у надбудові MS Excel «Пошук рішення» ("Solver").

**Обговорення результатів.** Порівняння результатів оптимізації складу гідрофобізуючої композиції (таблиця 5), показує, що значення оптимального складу композиції, отримані із застосуванням різних підходів, практично співпадають: відмінності результатів знаходяться в межах можливої похибки вимірювань.

Таблиця 5. Зведені результати оптимізації складу гідрофобізуючої композиції

| Метод оптимізації                  | Оптимальний склад композиції |        |        |        | Властивості гідрофобізованого велюру |        |         |
|------------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------------------------------------|--------|---------|
|                                    | $x_1$                        | $x_2$  | $x_3$  | $x_4$  | $y_1$                                | $y_2$  | $y_3$   |
| Мультиплікативна згортка           | 0,6500                       | 0,3040 | 0,0339 | 0,1333 | 98,806                               | 53,661 | 129,618 |
| Метод поступок                     | 0,6500                       | 0,3051 | 0,0339 | 0,1333 | 99,369                               | 53,725 | 130,117 |
| Підхід на основі функції бажаності | 0,6500                       | 0,3033 | 0,0339 | 0,1333 | 98,432                               | 53,608 | 129,277 |

**Висновки.** В результаті експериментальних досліджень отримано науково та практично значущі результати: запропоновано оптимальний склад гідрофобізуючої композиції на основі алкенів  $C_{20-24}$ , полімеризованих з малеїновим ангідридом: естери  $C_{18-22}$  малеїнової кислоти, парафіни легких фракцій  $C_{5-7}$ , етилцелозольв, пропанол, вода, сечовина у такому співвідношенні інгредієнтів: 0,3163 : 0,0770 : 0,0663 : 0,0354 : 0,475 : 0,03. Оптимізований склад наповнювально-гідрофобізуючої композиції може бути ефективно використаний у технологіях виготовлення овчинно-шубних та шкіряних матеріалів підвищеної водостійкості. Для вирішення задач багатокритеріальної оптимізації гідрофобізуючої композиції ефективним у цьому випадку виявився класичний метод мультиплікативної згортки (що показало порівняння результатів його застосування з результатами, отриманими ієрархічним методом послідовних поступок і з використанням функції бажаності Харінгтона). Слід, однак, зауважити, що з досвіду авторів найбільш надійним, з точки зору керованості й об'єктивності обчислювальної процедури, є підхід на основі функції бажаності, і саме цей підхід доцільно застосовувати у задачах багатоцільової оптимізації. Перспективним напрямом подальших розвідок є дослідження технологічних параметрів процесу гідрофобізації в системах «технологія–властивості» та «склад–технологія–властивості», які забезпечили б оптимальні значення споживацьких якостей гідрофобізованому велюру для виробництва нагальних виробів різного призначення, що експлуатуються в екстремальних умовах.

#### Список використаних джерел

- [1] *Resource-Saving Technologies for the Production of Elastic Leather Materials*: coll. monograph, A. Danylkovych and O. Korotych, Eds. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2020. [Online]. Available: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/18197>.
- [2] G. Krishnamoorthy, S. Sadulla, P. K. Sehgal, and A. B. Mandal, "Green chemistry approaches to leather tanning process for making chrome-free leather by unnatural amino acids", *Journal of Hazardous Materials*, pp. 215-216, 173-182, 2012. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.02.046.
- [3] Zhihui Sui, Yaping Li et al., "Preparation and properties of polysiloxane modified fluorine-containing waterborne polyurethane emulsion", *Progress in Organic Coatings*, vol. 166, no. 106783, 2022. doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.106783.
- [4] З. К. Низамова, М. В. Калинин, Н. В. Евсюкова и др., "Оценка эффективности препаратов для поверхностной гидрофобизации спилка", *Кожевенно-обувная промышленность*, № 2, с. 18-19, 2012.
- [5] Shuangfeng Xu, and Bi Shi, "A green and sustainable strategy for leather manufacturing: Endow dehydrated hide with consistent and durable hydrophobicity", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, no. 135526, 2023. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135526.
- [6] А. М. Джураев, Т. Ж. Кадилов, и А. Ю. Тошев, "Влияние гидрофобизации на эксплуатационные свойства кож для верха обуви", *Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование*, с. 48-54, 2015.
- [7] Н. В. Ермоленко, "О влиянии фторсодержащего соединения на гидрофобные свойства кожи", *Кожевенно-обувная промышленность*, № 3, с. 30-31, 2003.
- [8] V. F. M. Silva, M. Moncada, A. Crispim et.al., "Studies on waterproofing wet-white leather", *Leather and Footwear Journal*, vol. 18 (2), pp. 149-152, 2018. doi: 10.24264/lfj.18.2.10.

- [9] J. Du, C. Huang, and B. Pen, "Influence of hydrophobic side chain structure on the performance of amphiphilic acrylate copolymers in leather-making", *SLTC journal*, vol. 100, no. 2, pp. 67-72, 2016.
- [10] C. Casas, J. Bou, L. Olle, and A. Bacardit, "Development of nanocomposites with self-cleaning properties for textile and leather", *SLTC journal*, vol. 102, no. 1, pp. 33-41, 2018.
- [11] O. Andreyeva, and I. Gryshchenko, *Natural Products Chemistry: tutorial*. Kyiv, Ukraine: Svit uspichu, 2022.
- [12] А. Г. Данилкович, *Сучасне виробництво хутра: навч. посіб.*, В. І. Ліщук та Л. В. Стрембулевич, Ред. Київ, Україна: Фенікс, 2015.
- [13] А. Г. Данилкович, *Практикум з хімії і технології шкіри та хутра: навч. посіб.* Київ, Україна: Фенікс, 2006.
- [14] А. Г. Данилкович, Н. Б. Хлебнікова, О. Р. Мокроусова, та К. І. Петко, "Композиція для гідрофобізації ворсової шкіри, хутрового велюру, шубної овчини і виробів з них", *пат. на корисну модель № 38472 Україна, МПК<sup>7</sup> C 14 C 9/00, № и 200810214*, заявл. 08.08.2008, опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1.
- [15] J. A. Cornell, *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, 3rd ed. New York: Wiley, 2002.
- [16] G. F. Piepel, "Component effects in constrained mixture experiments", *Technometrics*, vol. 24 (1), pp. 29-39, 1982. doi: 10.1080/00401706.1982.10487706.
- [17] H. Goldfarb, C. Anderson-Cook, C. Borror, and D. Montgomery, "Fraction of design space plots for assessing mixture and mixture-process designs", *Journal of Quality Technology*, vol. 36 (2), pp. 169-179, 2004. doi: 10.1080/00224065.2004.11980263.
- [18] P. Kristoffersen, and B. J. Smucker, "Model-robust design of mixture experiments", *Quality Engineering*, pp. 1-13, 2020. doi: 10.1080/08982112.2020.1722831.
- [19] A. Heredia-Langner, D. Montgomery, W. M. Carlyle, and C. M. Borror, "Model-robust optimal designs: A genetic algorithm approach", *Journal of Quality Technology*, vol. 36 (3), pp. 263-279, 2004. doi: 10.1080/00224065.2004.11980273.
- [20] А. Н. Данилкович, and О. І. Коротич, "Optimization of leather filling composition containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles", USA: *JAL-CA*, vol. 114, pp. 333-343, 2019.
- [21] V. L. Anderson, and R. A. McLean, *Design of Experiments: A Realistic Approach*, Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong, 1974.
- [22] J. Langguth, A. Azad, M. Halappanavar, and F. Manne, "On parallel push-relabel based algorithms for bipartite maximum matching", *Parallel Computing*, vol. 40 (7), pp. 289-308, 2014. doi: 10.1016/j.parco.2014.03.004.
- [23] А. Г. Данилкович, та А. М. Шахновський, "Розроблення наповнювально-гідрофобізуючої композиції у виробництві велюру зі шкурки нутрії: досвід багатопараметричної оптимізації", *Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку: зб. наук. статей*, Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, с. 161-168, 2020.
- [24] A. Danylkovich, V. Lishchuk, and A. Shakhnovsky, "Improvement of structure determining qualitative characteristics of hydrophobized velour", *Fibres and Textiles (Vlákna a textil)*, no. 3, vol. 27, pp. 41-48, 2020. [Online]. Available: [http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT\\_2020\\_3\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT_2020_3_8.pdf).

## References

- [1] *Resource-Saving Technologies for the Production of Elastic Leather Materials*: coll. monograph, A. Danylkovich and O. Korotych, Eds. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2020. [Online]. Available: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/18197>.
- [2] G. Krishnamoorthy, S. Sadulla, P. K. Sehgal, and A. B. Mandal, "Green chemistry approaches to leather tanning process for making chrome-free leather by unnatural amino acids", *Journal of Hazardous Materials*, pp. 215-216, 173-182, 2012. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.02.046.
- [3] Zhihui Sui, Yaping Li et al., "Preparation and properties of polysiloxane modified fluorine-containing waterborne polyurethane emulsion", *Progress in Organic Coatings*, vol. 166, no. 106783, 2022. doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.106783.
- [4] Z. K. Nizamova, M. V. Kalinin, N. V. Evsyukova et al., "Evaluation of the effectiveness of drugs for surface hydrophobization

- of split leather", *Kozhevenno-obuvnaya promyshlennost*, no. 2, pp. 18-19, 2012 [in Russian].
- [5] Shuangfeng Xu, and Bi Shi, "A green and sustainable strategy for leather manufacturing: Endow dehydrated hide with consistent and durable hydrophobicity", *Journal of Cleaner Production*, vol. 383, no. 135526, 2023.  
doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135526.
- [6] A. M. Dzhuraev, T. Zh. Kadirov, and A. Yu. Toshev, "Influence of hydrophobization on the performance properties of leathers for shoe uppers", *Kozha i meh v XXI veke: tehnologiya, kachestvo, ekologiya, obrazovanie*, pp. 48-54, 2015 [in Russian].
- [7] N. V. Ermolenko, "On the effect of a fluorine-containing compound on the hydrophobic properties of the skin", *Kozhevenno-obuvnaya promyshlennost*, no. 3, pp. 30-31, 2003 [in Russian].
- [8] V. F. M. Silva, M. Moncada, A. Crispim et.al., "Studies on waterproofing wet-white leather", *Leather and Footwear Journal*, vol. 18 (2), pp. 149-152, 2018.  
doi: 10.24264/lfj.18.2.10.
- [9] J. Du, C. Huang, and B. Pen, "Influence of hydrophobic side chain structure on the performance of amphiphilic acrylate copolymers in leather-making", *SLTC journal*, vol. 100, no. 2, pp. 67-72, 2016.
- [10] C. Casas, J. Bou, L. Olle, and A. Bacardit, "Development of nanocomposites with self-cleaning properties for textile and leather", *SLTC journal*, vol. 102, no. 1, pp. 33-41, 2018.
- [11] O. Andreyeva, and I. Gryshchenko, *Natural Products Chemistry: tutorial*. Kyiv, Ukraine: Svit uspichu, 2022.
- [12] A. H. Danylkovych, *Modern production of fur: manual*, V. I. Lishchuk, and L. V. Strembulovich, Eds. Kyiv, Ukraine: Feniks, 2015 [in Ukrainian].
- [13] A. H. Danylkovych, *Workshop on chemistry and technology of leather and fur: manual*, Kyiv, Ukraine: Feniks, 2006 [in Ukrainian].
- [14] A. H. Danylkovych, N. B. Khliebnikova, O. R. Mokrousova, and K. I. Petko, "Composition for hydrophobization of pile leather, fur velor, fur sheepskin and products made from them", *Pat. for utility model no. 38472 Ukraine, IPK7 C 14 C 9/00, no. u 200810214*, appl. 08.08.2008, publ. 12.01.2009, Bull. no. 1 [in Ukrainian].
- [15] J. A. Cornell, *Experiments with Mixtures: Designs, Models, and the Analysis of Mixture Data*, 3rd ed. New York: Wiley, 2002.
- [16] G. F. Piepel, "Component effects in constrained mixture experiments", *Technometrics*, vol. 24 (1), pp. 29-39, 1982.  
doi: 10.1080/00401706.1982.10487706.
- [17] H. Goldfarb, C. Anderson-Cook, C. Borror, and D. Montgomery, "Fraction of design space plots for assessing mixture and mixture-process designs", *Journal of Quality Technology*, vol. 36 (2), pp. 169-179, 2004.  
doi: 10.1080/00224065.2004.11980263.
- [18] P. Kristoffersen, and B. J. Smucker, "Model-robust design of mixture experiments", *Quality Engineering*, pp. 1-13, 2020.  
doi: 10.1080/08982112.2020.1722831.
- [19] A. Heredia-Langner, D. Montgomery, W. M. Carlyle, and C. M. Borror, "Model-robust optimal designs: A genetic algorithm approach", *Journal of Quality Technology*, vol. 36 (3), pp. 263-279, 2004.  
doi: 10.1080/00224065.2004.11980273.
- [20] A. H. Danylkovych, and O. I. Korotych, "Optimization of leather filling composition containing SiO<sub>2</sub> nanoparticles", *USA: JALCA*, vol. 114, pp. 333-343, 2019.
- [21] V. L. Anderson, and R. A. McLean, *Design of Experiments: A Realistic Approach*, Marcel Dekker, New York, Basel, Hong Kong, 1974.
- [22] J. Langguth, A. Azad, M. Halappanavar, and F. Manne, "On parallel push-relabel based algorithms for bipartite maximum matching", *Parallel Computing*, vol. 40 (7), pp. 289-308, 2014.  
doi: 10.1016/j.parco.2014.03.004.
- [23] A. H. Danylkovych, and A. M. Shakhnovsky, "Development of a filling-hydrophobic composition in the production of velor from nutria skins: experience of multiparameter optimization", *Kompjuterne modelyuvannya v khimiyi ta tekhnolohiyakh i systemakh staloho rozvytku: coll. of sci. papers*, Kyiv: Igor Sikorski KPI, pp. 161-168, 2020 [in Ukrainian].
- [24] A. Danylkovych, V. Lishchuk, and A. Shakhnovsky, "Improvement of structure determining qualitative characteristics of hydrophobized velour", *Fibres and Textiles (Vlákna a textil)*, no. 3, vol. 27, pp. 41-48, 2020. [Online]. Available: [http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT\\_2020\\_3\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT_2020_3_8.pdf).

A. H. Danylkovych<sup>1</sup>, D. Sc., Professor,  
e-mail: ag101@ukr.net

O. V. Sanhina<sup>2</sup>, Ph. D., Associate Professor,

A. M. Shakhnovskyi<sup>2</sup>, Ph. D., Associate Professor

<sup>1</sup>Kyiv National University of Technologies and Design

Mala Shyjanovska st., 2, Kyiv, 01011, Ukraine

<sup>2</sup>Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

Beresteysky ave, 37, 03056, Ukraine

## COMPUTER SIMULATION AND OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF THE HYDROPHOBISING MIXTURE

*Scientifically based determination of the optimal qualitative and quantitative composition of the hydrophobizing mixture to ensure increased water resistance of leather and fur materials is relevant. The article is devoted to computer simulation and optimization of the composition of the hydrophobizing mixture based on C<sub>20-24</sub> alkenes polymerized with maleic anhydride.*

**Statement of the problem.** *Scientifically based determination of the optimal qualitative and quantitative composition of the mixture to ensure increased water resistance of leather and fur materials is relevant.*

**Analysis of recent research and publications.** *The analysis of scientific and technical literature indicates the use of a wide range of reagents and materials of different chemical composition, in particular, derivatives of fatty and oxycarboxylic acids, organosilicon compounds of solid hydrocarbons in the technology of forming leather and fur materials and products, with most recommendations in this field based on empirical principles.*

**The purpose of the article.** *The purpose of this study is to establish the optimal composition of the hydrophobizing composition based on alkenmaleic polymer for fur velour using computer modeling and optimization.*

**Presentation of the main material.** *The hydrophobizing mixture is intended to improve the operational characteristics of natural polymers, in particular, fur velour obtained from semi-fine-wooled sheepskins. During the research, the methods of experimental and statistical simulation and mathematical programming were used to find the optimal composition of the filler-hydrophobic mixture. The stage of experimental and statistical simulation included, in particular, D-optimal simplex-lattice experimental design with restrictions on the composition of components, which was synthesized by the original procedure as well as parametric identification of the model and analysis of variances. At the stage of optimization based on the nonlinear multifactor and multiobjective optimization model the classical multiplicative convolution method as well as convolution by the Harrington desirability function-based approach, and also the hierarchical method of successive concessions were used to determine the optimal composition of the hydrophobizing mixture.*

**Results.** *As a result of research, the optimal composition of the filler-hydrophobizing mixture containing C<sub>18-22</sub> maleic acid ester, C<sub>5-7</sub> light fraction paraffins, ethyl cellosolve, propanol, water, and urea (in the 0.3163 : 0.0770 : 0.0663 : 0.0354 : 0.475 : 0.03 ratio) was proposed.*

**Conclusion.** *The optimized composition of the filler-hydrophobic mixture can be successfully used in the production technologies of sheepskin and leather materials with increased water resistance. According to the totality of its properties, the hydrophobized velour obtained using the mixture is suitable for the production of clothing for various purposes, which is used in extreme conditions.*

**Keywords:** *fur velour, filling, hydrophobization, experiment planning, synthesis of the experiment plan, mathematical model, multi-criteria optimization.*

УДК / 66.065.58

[0000-0003-2617-5610] **Я. Е. Михайловський**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: y.mykhailovskyi@pohnp.sumdu.edu.ua

[0000-0002-1405-1269] **М. П. Юхименко**, канд. техн. наук, доцент,

e-mail: m.yukhymenko@pohnp.sumdu.edu.ua

[0000-0003-0045-3416] **Р. О. Острога**, канд. техн. наук, доцент

e-mail: r.ostroga@pohnp.sumdu.edu.ua

Сумський державний університет

вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, Україна

## ОХОЛОДЖУВАЛЬНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ ПЕРСУЛЬФАТУ АМОНІЮ В КРИСТАЛІЗАТОРІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ

Обґрунтовано доцільність використання класифікуючих кристалізаторів для одержання крупнокристалічного продукту однорідного гранулометричного складу. При цьому зазначено, що в цьому типі кристалізаційного обладнання, на відміну від відомих конструкцій, разом із процесом зростання кристалів у висхідному потоці розчину відбувається їх гідравлічна класифікація за розмірами. Метою роботи є проведення експериментальних досліджень та виявлення основних факторів, що впливають на процес кристалізації персульфату амонію у псевдозрідженому шарі, а також розроблення методики розрахунку охолоджувального класифікуючого кристалізатора у виробництві персульфату амонію. Розроблена авторами методика математичного оброблення результатів дослідів базується на динамічній моделі процесу гідрокласифікації та зростання кристалів у циліндроконічному класифікуючому кристалізаторі. При цьому запропоновано весь об'єм псевдозрідженого шару кристалів розглядати розділеним на кінцеву кількість вузьких монофракцій, кожна з яких характеризується певними гідродинамічними та масообмінними параметрами. Результатами експериментальних досліджень та їх математичного оброблення визначені основні параметри процесу кристалізації персульфату амонію в псевдозрідженому шарі. Зазначено, що розчини персульфату амонію і сульфату амонію є помірно стійкими, що за умов невисокого контрольованого пересичення розчину та наявності достатньої маси псевдозрідженого шару дозволяє їх використовувати в класифікуючих кристалізаторах для одержання крупнокристалічного класифікованого продукту гарної якості.

**Ключові слова:** класифікуючий кристалізатор, кристали, пересичення розчину, гідрокласифікація, масопередача.

**Вступ.** У технології отримання мінеральних солей однією з найважливіших завершальних технологічних операцій є кристалізація – процес виділення з розчину твердої фази у вигляді кристалів визначеного розміру та форми. Від умов проведення цього процесу залежать чистота й однорідність солі, крупність та форма отриманих кристалів, їх вологість після центрифугування і сушіння, злежуваність при зберіганні [1, 2, 3]. Отримання крупнокристалічного осаду з розміром кристалів 1–2 мм дозволяє збільшити швидкість та економічність наступних технологічних операцій, покращити якість та споживчі властивості солі.

Для отримання крупнокристалічних солей однорідного складу в промисловості використовують класифікуючі кристалізатори,

що забезпечують безперервний хід процесу та отримання продукту заданого розміру у висхідному потоці розчину.

Перші відомості про використання класифікуючих кристалізаторів для отримання кристалів згадуються в середині ХХ ст. [4]. Надалі кристалізатори класифікуючого типу зазнавали конструктивних модернізацій, що привело до інтенсифікації процесу кристалізації [5, 6]. Найбільш ефективними є класифікуючі кристалізатори із псевдозрідженим шаром [7].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В роботі [8] розроблено моделювання кристалізатора безперервної дії із псевдозрідженим шаром. Модель базується на описі псевдозрідженого шару як багатоступінчастого кристалізатора, щоб врахувати сегрегацію

та перемішування частинок усередині шару. Ця модель порівнюється з експериментальними даними, одержаними при лабораторній кристалізації тетрагідрату перборату натрію.

В роботі [9] досліджується безперервний процес класифікації кристалів з використанням двох зв'язаних кристалізаторів з псевдозрідjenим шаром. Для виявлення суттєвих кореляцій між різними робочими параметрами та відповідною продуктивністю процесу досліджується процес кристалізації аспарагіну моногідрату.

В роботі [10] автори займалися дослідженнями та розробками, що стосуються відновлення фосфат магнію-амонію (ФМА) з використанням системи видалення кристалізованого фосфору у псевдозрідjenому шарі. У реакторі системи видалення кристалізованого фосфору з псевдозрідjenим шаром затравальні кристали МАФ попередньо псевдозріджують, і на поверхні затравальних кристалів утворюються нові кристали МАФ.

У роботі [11] розглядається процес кристалізації у псевдозрідjenому шарі з використанням двох зв'язаних кристалізаторів, які працюють в умовах безперервної кристалізації у двох потрійних системах, а саме: орто-амінобензойна кислота/пара-амінобензойна кислота/вода та моногідрат *l*-аспарагіну, *d*-аспарагіну моногідрат/вода. Безперервна подача затравки здійснювалася шляхом ультразвукового подрібнення кристалів, що виводяться з дна частково конічних кристалізаторів із псевдозрідjenим шаром. Видалення продукту відбувалося через випускні отвори, розташовані у певних місцях конічних секцій кристалізаторів. Розподіл кристалів за розмірами, а також чистота кристалів продукту досягли сталого стану з чистотою, що перевищує 97 %.

Автори у роботі [12] вимірювали швидкість розчинення і зростання кристалів алюмокалієвих галунів у кристалізаторі з псевдозрідjenим шаром, в якому швидкість потоку розчину була встановлена близькою до швидкості осадження кристалів затравки. Було виявлено, що коефіцієнти масопереносу для розчинення та зростання не залежать від розміру кристала та швидкості розчинення. Швидкість поверхневого росту кристалів виявилася функцією розміру кристала.

У дослідженні [13] авторами представлена нова модель контактної теорії утворення зародка у поєднанні з механізмом руйнування

кристалів, яка застосовується для опису процесу зіткнення при кристалізації хлориду натрію. Тут представлена модель зародження зв'язку, яка пов'язує кількість місць контакту-зіткнення при зародженні кристалів через частоту зіткнень та міжфазну енергію. Результати експерименту показують, що схильність до руйнування кристалів значно впливає на швидкість утворення зародка. Авторами підтверджено, що ця нова модель утворення зародка являє собою механізм зіткнення. Параметри моделі сильно пов'язані з фізичними властивостями кристала й умовами псевдозрідження.

Автори у роботі [14] досліджували вирощування кристалів фториду кальцію у кристалізаторі з псевдозрідjenим шаром. Швидкості росту кристалів визначали з норми витрати іонів фтору. Кінетику зростання досліджували з використанням двоступінчастої моделі зростання.

У роботі [15] кристалізація додекагідрату сульфату калію-алюмінію (калієвий галун) у кристалізаторі з псевдозрідjenим шаром вивчена як експериментально, так і за допомогою моделювання. Як модель використовується система балансу шару кристалів з трьома просторовими координатами та однією внутрішньою координатою (масою). Моделювання виконується стохастично детермінованим методом з новими розширеннями, де гідродинаміка кристалізатора (поле потоку, температура, концентрація) вирішується детерміністично, а рух частинок моделюються стохастичним методом. В експериментах тривалістю 30 хв середній діаметр кристалів збільшується за рахунок росту та агломерації приблизно з 130 до 210 мкм. Авторами стверджується, що це спостереження якісно добре узгоджується з результатами моделювання.

**Мета та задачі дослідження.** З літературного огляду випливає, що процеси кристалізації у псевдозрідjenому шарі розглядаються для конкретних речовин. А оскільки кінетика кристалізації залежить передусім від фізико-хімічних властивостей речовини, то й експериментальні результати досліджень процесу кристалізації цих конкретних речовин не можуть бути поширені на інші речовини. Тому умови процесу кристалізації у кристалізаторі псевдозрідjenого стану треба досліджувати окремо по кожній речовині. Це питання і є метою роботи.

Для вирішення цієї мети треба вирішити такі задачі:

- проведення експериментальних досліджень процесу кристалізації персульфату амонію у псевдозрідженому шарі;
- виявлення основних факторів, що впливають на процес кристалізації персульфату амонію у псевдозрідженому шарі;
- розроблення методики розрахунку охолоджувального класифікуючого кристалізатора у виробництві персульфату амонію.

**Матеріали та методи досліджень.** Досліди з кристалізації персульфату амонію та сульфату амонію проводили на лабораторній установці (рисунок 1), яка складається з трьох контурів: контуру циркуляції насиченого розчину; контуру живлення концентрованим розчином; контуру охолодження розчинів.

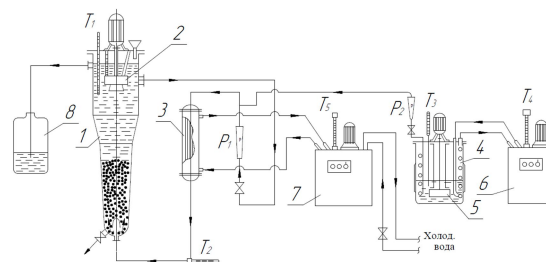
Контур циркуляції насиченого розчину містить класифікуючий кристалізатор 1 з розміщеним у ньому у верхній секції заглибним насосом 2, теплообмінник 3 і циркуляційні трубопроводи.

Контур живлення установки концентрованим розчином містить посудину живильного розчину 4 з розміщеним усередині неї обігрівачем змійовиком і заглибним насосом 5.

Контур термостатування містить термостат 6 для підтримання сталої температури живильного розчину, контур охолодження містить термостат 7, в якому підтримується стала температура за рахунок подавання в змійовик з водопроводу холодної води.

Класифікуючий кристалізатор виготовлений з органічного скла та складається з двох секцій – нижньої циліндричної внутрішнім діаметром 100 мм і верхньої діаметром 130 мм. У нижній секції кристалізатора змонтовано розподільний пристрій у вигляді патрубків, накритого високим ковпаком. Таке введення розчину забезпечує рівномірне псевдозрідження і не дозволяє кристалам потрапляти в циркуляційний трубопровід. Відбирання кристалів проводиться знизу через патрубків. У верхній секції апарата вмонтований заглибний відцентровий насос.

Усі циркуляційні трубопроводи зібрані зі скляних труб внутрішнім діаметром 15 мм. Температурний режим на установці контролювався термометрами  $T_1$ – $T_4$  з точністю 0,1 °С.



**Рисунок 1. Схема лабораторної установки для дослідження кристалізації персульфату амонію:**

1 – класифікуючий кристалізатор; 2, 5 – заглибний насос; 3 – теплообмінник; 4 – посудина живильного розчину; 6, 7 – термостат; 8 – збірник маточного розчину

**Методика математичного оброблення результатів дослідів.** На основі прийнятої [16] динамічної моделі процесу гідрокласифікації та зростання кристалів у ЦККК був розроблений метод інженерного розрахунку параметрів процесу кристалізації та основних конструктивних розмірів ЦККК з огляду на продуктивність кристалізатора, розмір продукційних кристалів і фізико-хімічних властивостей взаємодіючих фаз за температури кристалізації.

Увесь об'єм псевдозрідженого шару кристалів розглядався розділеним на кінцеве число вузьких монофракцій, кожна з яких характеризується середнім  $d_i$ , максимальним  $d_{ni}$  та мінімальним  $d_{ei}$  діаметром кристалів. Оскільки функція розподілу кристалів за розмірами безперервна, то  $d_{ni+1} = d_{ei}$ ,  $d_{ni} / d_{ei} = m_o$ , де  $m_o$  – прийнятий модуль дисперсності.

Середній еквівалентний діаметр монофракції кристалів знаходили за рівнянням

$$d_{ek} = \sqrt{d_1 \cdot d_2}, \quad (1)$$

де  $d_1$ ,  $d_2$  – діаметр комірки прохідного і непрохідного сит відповідно, мм.

Середній діаметр кристалів полідисперсної суміші частинок знаходили за залежністю

$$d_c = \sum_{i=1}^n m_i \cdot d_i, \quad (2)$$

де  $d_i$  – середній розмір монофракції зерен, мм;  $m_i$  – масова частка зерен у наважці кристалів.

Порозність нерухомого шару кристалів знаходили за формулою

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{V_{\kappa}}{V_{ни}} = 1 - \frac{G_{\kappa}}{0,785 D_1^2 \cdot h_0 \cdot \rho_{\kappa}}, \quad (3)$$

де  $G_k$  – наважка кристалів;  $\rho_k$  – густина кристалів;  $h_0$  – висота нерухомого шару кристалів;  $D_1$  – внутрішній діаметр апарата.

Порозність псевдозрідженого шару кристалів у процесі виконання дослідів визначали з рівняння

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon_0) \cdot h_0 / h_i, \quad (4)$$

де  $h_i$  – висота псевдозрідженого шару кристалів у досліді.

Результати дослідів з розширення псевдозрідженого шару кристалів обробляли у вигляді ступеневої залежності [17]

$$u = u_0 \cdot \varepsilon^z, \quad (5)$$

де  $u$ ,  $u_0$  – швидкість руху розчину у вільному перерізі апарата та швидкість вільного осадження кристалів відповідно;  $z$  – показник, що враховує розмір і форму кристалів, режим їх обтікання, а також фізико-хімічні властивості взаємодіючих фаз.

Рівняння (5) у логарифмічних координатах ( $\lg u - \lg \varepsilon$ ) можна представити прямою, за нахилом якої визначають показник  $z$ , а за відрізком, що відсікається на осі ординат, величину  $u_0$ .

На основі аналізу експериментальних даних з псевдозрідження неорганічних солей насиченими розчинами було знайдено, що показник у рівнянні (5) на ділянці розвинутого псевдозрідження з достатньою точністю можна вичислити за формулою

$$z = 5,2 / Ar^{0,06}, \quad (6)$$

де  $Ar$  – число Архімеда,  $Ar = d_{ek}^3 g \rho_p (\rho_k - \rho_p) / \mu_p^2$ ;  $d_{ek}$  – еквівалентний діаметр,  $d_{ek} = \psi d_k$ ;  $\psi$  – коефіцієнт форми, для кристалів персульфату амонію  $\psi = 0,77$ .

У роботах [18, 19] було показано, що для розрахунків робочої швидкості розчину у вільному перерізі апарата з огляду на порозність псевдозрідженого шару кристалів можна використати критеріальні рівняння:

– для діапазону чисел  $36 < Ar < 2500$

$$Re = 0,105 Ar^{0,78} \varepsilon^{5,2 / Ar^{0,06}}, \quad (7)$$

– для діапазону чисел  $2500 < Ar < 10^5$

$$Re = 0,335 Ar^{0,63} \varepsilon^{5,2 / Ar^{0,06}}. \quad (8)$$

За сталого процесу в нижній циліндричній секції апарата знаходяться продукційні

кристали максимального розміру  $d_k$ , середня кінцева секція є переважно ростовою та в ній викристалізовується до 70 % мас. солі, а на верхній межі псевдозрідженого шару у верхній циліндричній секції витають кристали мінімального розміру  $d_e$ , порівняного з діаметром зерен, що виносяться в циркуляційний цикл, при цьому для ЦККК  $d_k / d_e < 6$ .

Середнє в шарі пересичення розчину визначали за залежністю

$$\Delta C_{сер} = \Delta M_k / V_p, \quad (9)$$

де  $\Delta M_k$  – приріст маси кристалів у досліді;  $V_p$  – об'єм розчину, що пройшов через кристалізатор,  $V_p = (V_u + V_{ж}) \cdot \tau$ ;  $V_u$ ,  $V_{ж}$  – об'єми витрати циркуляційного та живильного розчину відповідно;  $\tau$  – тривалість досліді.

Середній для досліді поверхневий коефіцієнт масопередачі, що характеризує швидкість перенесення речовини з розчину до граней кристалів, розраховували за рівнянням

$$\beta_F = \Delta M_k / (\Delta C_{сер} \cdot F_p \cdot \tau), \quad (10)$$

де  $F_p$  – розрахункова поверхня кристалів, що дорівнює  $F_p = (F_k - F_z) / \ln(F_k / F_z)$ ;  $F_k$ ,  $F_z$  – поверхня отриманих кристалів і введеної заправки,  $F_z = 6G_z / (d_z \cdot \rho_k)$ ,  $F_k = 6G_k / (d_k \cdot \rho_k)$ .

Об'ємний коефіцієнт масопередачі, що характеризує швидкість перенесення кристалізованої солі в одиниці об'єму псевдозрідженого шару кристалів, визначали за залежністю

$$\beta_V = \Delta M_k / (\Delta C_{сер} \cdot V_{ми} \cdot \tau), \quad (11)$$

де  $V_{ми}$  – середній за час досліді об'єм псевдозрідженого шару кристалів,  $V_{ми} = (V_0 + V_k) / 2$ ;  $V_0$ ,  $V_k$  – об'єм псевдозрідженого шару кристалів на початку і наприкінці досліді відповідно.

Очікуваний (теоретичний) вихід кристалів впродовж досліді за повного зняття пересичення розчину знаходили за залежністю

$$\Delta M_0 = V_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \tau \cdot (X_n - X_k) / (100 - X_k) \quad (12)$$

де  $X_n$ ,  $X_k$  – початкова і кінцева концентрація розчину за сумарним вмістом солей, % мас;  $\rho_{ж}$  – густина живильного розчину.

Оскільки самовільне зародкоутворення в проведених дослідіх було відсутнє і спостерігалось чисте зростання кристалів в умовах слабо пересиченого розчину, то середній розмір одержуваних кристалів орієнтовно розраховували за формулою

$$d_k = d_z \sqrt[3]{1 + V_{жс} \cdot \rho_{жс} \cdot \tau \cdot \Delta C_{сер} / G_z}, \quad (13)$$

де  $V_{жс}$  – об’ємна витрата живильного розчину, л/с;  $\rho_{жс}$  – густина живильного розчину, кг/л;  $\tau$  – тривалість досліду, с;  $\Delta C_{сер}$  – середнє пересичення розчину, г/кг;  $G_z$  – маса введеної затравки, г.

Розрахунок параметрів псевдозрідженого шару кристалів ведеться за допомогою отриманих рівнянь пофракційно, починаючи з нижньої продукційної монофракції, для якої визначається оптимальна порозність, при цьому параметри псевдозрідженого шару на верхній межі  $i$ -тої монофракції є вхідними для  $(i + 1)$ -ї монофракції.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Досліди показали, що розширення псевдозрідженого шару кристалів персульфату амонію внаслідок їх пластинчастої форми відбувається легко і рівномірно. Режим обтікання кристалів із середнім розміром зерен 0,3–0,5 мм відповідає початковій ділянці перехідної області, що характеризується переважним впливом в’язкісних сил і відповідним діапазоном чисел Архімеда  $36 < Ar < 1000$ .

Під час проведення дослідів у періодичному режимі без введення затравки мимовільна кристалізація солі починалася за температур 28,8–28,5 °С, що відповідає переохолодженню розчину 1,2–1,5 °С. Якщо звертати увагу на те, що під час охолодження 1 кг насиченого розчину на 10 °С від температури 30 °С до температури 20 °С відповідно до рівняння (12) виділяється близько 38 г персульфату амонію, то граничне пересичення розчину, відповідне другій метастабільній границі, дорівнює 5,5–7 г солі/л розчину.

Цей факт дозволяє зробити висновок, що розчини, які містять персульфат амонію і сульфат амонію, є помірно стійкими, що дозволяє їх використовувати в класифікуючих кристалізаторах для отримання крупнокристалічного продукту.

В дослідах з безперервним веденням процесу в присутності затравки суміш розчинів переохолоджували в теплообміннику на 0,1 °С нижче температури насичення, що з огляду на об’ємне співвідношення потоків 1 : (50–100) відповідало середньому пересиченню розчину на вході в шар 0,47–0,95 г солі/л розчину та виключало мимовільне виникнення зародків у процесі зростання затравки. При цьому не спостерігалось заростання теплообмінної поверхні інкрустаціями солі, що в

поєднанні з граничним рівнем пересичення розчину, що досягається, свідчить про можливість довготривалої роботи холодильника без заростання труб.

Одержаний продукт являв собою сипучу сіль з чітко вираженою кристалічною решіткою – прозорі кристали пластинчастої прямокутної або ромбовидної форми. Збільшення об’ємної витрати циркулюючого розчину сприяло класифікації кристалів за розмірами, проте це призвело до накопичення дрібних кристалів у верхній частині псевдозрідженого шару та ускладнювало їх зростання. В цілому ж спостерігалось рівномірне зростання затравкових кристалів, при розсіві отриманого продукту на наборі сит між двома суміжними ситами затримувалося 70–85 % загальної маси наважки.

На основі проведених дослідів можна зробити висновок, що в умовах невисокого пересичення розчину і наявності достатньої маси псевдозрідженого шару спостерігається зростання кристалів без помітного зародкоутворення, що дозволяє отримувати крупнокристалічний продукт гарної якості.

У проведених дослідах з кристалізації персульфату амонію знайдено, що поверхневий коефіцієнт масопередачі, розрахований за рівнянням (10), становив величину 0,08–0,12 кг/(м<sup>2</sup>·год·о. р. с) залежно від розміру зерен, швидкості руху і пересичення розчину, причому перші дві величини впливають значно більшою мірою, ніж остання. Об’ємний коефіцієнт масопередачі для кристалів персульфату амонію залежно від розміру кристалів і порозності псевдозрідженого шару змінювався в діапазоні 140–180 кг/(м<sup>3</sup>·год·о. р. с).

**Висновки.** Отримано такі найважливіші наукові і практичні результати:

1. На основі аналізу відомих конструкцій охолоджувальних кристалізаторів було виявлено, що найбільш доцільними для одержання крупних кристалів персульфату амонію однорідного гранулометричного складу є кристалізатори класифікуючого типу з псевдозрідженим шаром кристалів.

2. Проведено лабораторні дослідження процесу кристалізації персульфату амонію, на основі яких вивчено вплив умов гідродинаміки на масоперенесення в завислому шарі кристалів і одержані дані для проектування кристалізаційної установки з класифікуючим кристалізатором.

На основі одержаних результатів із дослідження процесу кристалізації персульфату амонію в псевдозрідженому шарі передбачається створення інженерної методики розрахунку охолоджувальних класифікуючих кристалізаторів, розроблення технічної документації дослідно-промислової кристалізаційної установки для одержання класифікованого крупнокристалічного персульфату амонію з подальшим впровадженням результатів цієї роботи у виробництво.

### Список використаних джерел

- [1] *Handbook of Industrial Crystallization*, 3<sup>rd</sup> ed., Allan S. Myerson, Massachusetts Institute of Technology, Deniz Erdemir, Bristol-Myers Squibb, USA, Alfred Y. Lee, Merck & Co., Inc., Eds. Cambridge University Press, 2019.  
doi: 10.1017/9781139026949.
- [2] S. Y. Misyura, and V. S. Morozov, "Crystallization of salt solutions on surface of droplet and layer", *J. Eng. Thermophys.*, no. 28, pp. 381-391, 2019.  
doi: 10.1134/S1810232819030081.
- [3] D. A. Weingaertner, S. Lynn, and D. N. Hanson, "Extractive crystallization of salts from concentrated aqueous solution", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, iss. 3, pp. 490-501, 1991.  
doi: 10.1021/ie00051a009.
- [4] H. Svanoe, "Krystal" classifying crystallizer", *Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, iss. 5, pp. 636-639, 1940.  
doi: 10.1021/ie50365a011.
- [5] J. W. Mullin, "Crystallizer design and operation", in *Industrial Crystallization*, J. W. Mullin, Ed. Springer, Boston, MA., pp. 291-302, 1976.  
doi: 10.1007/978-1-4615-7258-9\_28.
- [6] C. D. Han, and R. Shinnar, "The steady state behavior of crystallizers with classified product removal", *AIChE Journal*, vol. 14, iss. 4, pp. 612-619, 1968.  
doi: 10.1002/aic.690140413.
- [7] A. P. Vragov, "Simulating and designing cylinder-cone classifying crystallizers", *Chem. Petrol Eng.*, no. 35, pp. 189-198, 1999.  
doi: 10.1007/BF02368679.
- [8] C. Frances, B. Biscans, and C. Laguerie, "Modelling of a continuous fluidized-bed crystallizer effects of mixing and segregation on crystal size distribution during the crystallization of tetrahydrate sodium perborate", *Chem. Eng. Science*, vol. 49, iss. 19, pp. 3269-3276, 1994.  
doi: 10.1016/0009-2509(94)00135-9.
- [9] E. Temmel, J. Gänsch, A. Seidel-Morgenstern, and H. Lorenz, "Systematic investigations on continuous fluidized bed crystallization for chiral separation", *Crystals*, vol. 10, no. 394, 2020.  
doi: 10.3390/cryst10050394.
- [10] K. Shimamura, T. Tanaka, Y. Miura, and H. Ishikawa, "Development of a high-efficiency phosphorus recovery method using a fluidized-bed crystallized phosphorus removal system", *Water Science and Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 163-170, 2003.
- [11] D. Binev, A. Seidel-Morgenstern, and H. Lorenz, "Continuous separation of isomers in fluidized bed crystallizers", *Cryst. Growth Des.*, vol. 16, no. 3, pp. 1409-1419, 2016.  
doi: 10.1021/acs.cgd.5b01513.
- [12] C. Y. Tai, Ch.-Yu Chen, and J.-F. Wu, "Crystal dissolution and growth in a lean fluidized bed crystallizer", *Chem. Eng. Communications*, vol. 56, iss. 1-6, pp. 329-340, 1987.  
doi: 10.1080/00986448708911953.
- [13] D. Zheng, W. Zou, J. Yan et al., "Coupling of contact nucleation kinetics with breakage model for crystallization of sodium chloride crystal in fluidized bed crystallizer", *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 1-11, 2019.  
doi: 10.1155/2019/2150560.
- [14] C. Y. Taia, P. C. Chenb, and T. M. Tsao, "Growth kinetics of CaF<sub>2</sub> in a pH-stat fluidized-bed crystallizer", *Journal of Crystal Growth*, vol. 290, iss. 2, pp. 576-584, 2006.  
doi: 10.1016/j.jcrysgro.2006.02.036.
- [15] C. Bartscha, V. Wiedmeyer, Z. Lakdawala et al., "Stochastic-deterministic population balance modeling and simulation of a fluidized bed crystallizer experiment", *Chem. Eng. Science*, vol. 208, no. 115102, 2019.  
doi: 10.1016/j.ces.2019.07.020.
- [16] Я. Е. Михайловський, "Динаміка процесу кристалізації в циліндроконічному класифікуючому кристалізаторі", автореф. канд. техн. наук, спец. 05.05.13 – машини та апарати хімічних виробництв, Вид-во СумДУ, Суми, 1999.
- [17] *Псевдооживление*, И. Дэвидсон и Д. Харрисон, Ред. Москва, Россия: Химия, 1974.
- [18] А. П. Врагов, *Проектирование и расчет кристаллизационных установок с клас-*

сифицирующими кристаллизаторами. Киев, Украина: УМК ВО, 1988.

- [19] А. П. Врагов, *Журн. прикл. химии*, т. 60, № 9, с. 2007-2019, 1987.

### References

- [1] *Handbook of Industrial Crystallization*, 3<sup>rd</sup> ed., Allan S. Myerson, Massachusetts Institute of Technology, Deniz Erdemir, Bristol-Myers Squibb, USA, Alfred Y. Lee, Merck & Co., Inc., Eds. Cambridge University Press, 2019.  
doi: 10.1017/9781139026949.
- [2] S. Y. Misyura, and V. S. Morozov, "Crystallization of salt solutions on surface of droplet and layer", *J. Eng. Thermophys.*, no. 28, pp. 381-391, 2019.  
doi: 10.1134/S1810232819030081.
- [3] D. A. Weingaertner, S. Lynn, and D. N. Hanson, "Extractive crystallization of salts from concentrated aqueous solution", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, iss. 3, pp. 490-501, 1991.  
doi: 10.1021/ie00051a009.
- [4] H. Svanoe, "Krystal" classifying crystallizer", *Ind. Eng. Chem.*, vol. 32, iss. 5, pp. 636-639, 1940.  
doi: 10.1021/ie50365a011.
- [5] J. W. Mullin, "Crystallizer design and operation", in *Industrial Crystallization*, J. W. Mullin, Ed. Springer, Boston, MA., pp. 291-302, 1976.  
doi: 10.1007/978-1-4615-7258-9\_28.
- [6] C. D. Han, and R. Shinnar, "The steady state behavior of crystallizers with classified product removal", *AIChE Journal*, vol. 14, iss. 4, pp. 612-619, 1968.  
doi: 10.1002/aic.690140413.
- [7] A. P. Vragov, "Simulating and designing cylinder-cone classifying crystallizers", *Chem. Petrol Eng.*, no. 35, pp. 189-198, 1999.  
doi: 10.1007/BF02368679.
- [8] C. Frances, B. Biscans, and C. Laguerie, "Modelling of a continuous fluidized-bed crystallizer effects of mixing and segregation on crystal size distribution during the crystallization of tetrahydrate sodium perborate", *Chem. Eng. Science*, vol. 49, iss. 19, pp. 3269-3276, 1994.  
doi: 10.1016/0009-2509(94)00135-9.
- [9] E. Temmel, J. Gänsch, A. Seidel-Morgenstern, and H. Lorenz, "Systematic investigations on continuous fluidized bed crystallization for chiral separation", *Crystals*, vol. 10, no. 394, 2020.  
doi: 10.3390/cryst10050394.
- [10] K. Shimamura, T. Tanaka, Y. Miura, and H. Ishikawa, "Development of a high-efficiency phosphorus recovery method using a fluidized-bed crystallized phosphorus removal system", *Water Science and Technology*, vol. 48, no. 1, pp. 163-170, 2003.
- [11] D. Binev, A. Seidel-Morgenstern, and H. Lorenz, "Continuous separation of isomers in fluidized bed crystallizers", *Cryst. Growth Des.*, vol. 16, no. 3, pp. 1409-1419, 2016.  
doi: 10.1021/acs.cgd.5b01513.
- [12] C. Y. Tai, Ch.-Yu Chen, and J.-F. Wu, "Crystal dissolution and growth in a lean fluidized bed crystallizer", *Chem. Eng. Communications*, vol. 56, iss. 1-6, pp. 329-340, 1987.  
doi: 10.1080/00986448708911953.
- [13] D. Zheng, W. Zou, J. Yan et al., "Coupling of contact nucleation kinetics with breakage model for crystallization of sodium chloride crystal in fluidized bed crystallizer", *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 1-11, 2019.  
doi: 10.1155/2019/2150560.
- [14] C. Y. Taia, P. C. Chenb, and T. M. Tsao, "Growth kinetics of CaF<sub>2</sub> in a pH-stat fluidized-bed crystallizer", *Journal of Crystal Growth*, vol. 290, iss. 2, pp. 576-584, 2006.  
doi: 10.1016/j.jcrysgro.2006.02.036.
- [15] C. Bartscha, V. Wiedmeyer, Z. Lakdawala et al., "Stochastic-deterministic population balance modeling and simulation of a fluidized bed crystallizer experiment", *Chem. Eng. Science*, vol. 208, no. 115102, 2019.  
doi: 10.1016/j.ces.2019.07.020.
- [16] Ja. E. Mikhajlovskiy, "Dynamics of the crystallization process in a cylindroconical classifying crystallizer", Ph.D. thesis, Vyd-vo SumDU, Sumy, 1999 [in Ukrainian].
- [17] *Fluidization*, J. F. Davidson, and D. Harrison, Eds, Moscow, Russia: Khimiia, 1974 [in Russian].
- [18] A. P. Vragov, *Design and calculation of crystallization plants with classifying molds*. Kiev, Ukraine: УМК ВО, 1988 [in Russian].
- [19] A. P. Vragov, *Zhurn. prykl. khimiyi*, vol. 60, no. 9, pp. 2007-2019, 1987 [in Russian].

**Ja. E. Mykhajlovskyi**, *Ph. D., Associate Professor*,  
e-mail: y.mykhailovskyi@pohnp.sumdu.edu.ua

**M. P. Yukhymenko**, *Ph. D., Associate Professor*,  
e-mail: m.yukhymenko@pohnp.sumdu.edu.ua

**R. O. Ostroga**, *Ph. D., Associate Professor*  
e-mail: r.ostroga@pohnp.sumdu.edu.ua

Sumy State University

Rymskoho-Korsakova st., 2, Sumy, 40007, Ukraine

## **COOLING CRYSTALLIZATION OF AMMONIUM PERSULFATE IN A CRYSTALLIZER WITH A PSEUDO-FLUIDIZED LAYER**

*The expediency of using classifying crystallizers for obtaining a coarse-crystalline product with a homogeneous granulometric composition is substantiated. At the same time, it is noted that in this type of crystallization equipment, under conditions of controlled supersaturation, along with the process of crystal growth in the upward flow of the solution, their hydraulic classification by size takes place.*

*Based on the literature analysis, the purpose and tasks of this work, which consist in conducting experimental studies and identifying the main factors affecting the process of crystallization of ammonium persulfate in a fluidized bed, as well as in developing a method for calculating the cooling classifying crystallizer in the production of ammonium persulfate, are formulated.*

*The method of mathematical processing of experimental results, which is based on a dynamic model of the hydroclassification process and crystal growth in a cylindroconical classifying crystallizer, is described. At the same time, it is proposed to consider the entire volume of the fluidized bed of crystals divided into a finite number of narrow monofractions, each of which is characterized by certain hydrodynamic and mass transfer parameters.*

*The results of experimental studies and their mathematical processing according to the appropriate method present the determination of the main characteristics of the process of crystallization of ammonium persulfate in a fluidized bed, namely: the average equivalent diameter of the monofraction and polydisperse mixture of crystals, the local porosity of the fluidized bed of crystals, the speed of movement of the solution in the local free section of the crystal grower and the speed of free precipitation of crystals, the average supersaturation of the solution in the fluidized bed, the average and local surface and volume mass transfer coefficients, the expected yield of crystals upon complete removal of the supersaturation of the solution, as well as the average size of the resulting crystals.*

*During the discussion of the research results, it was noted that solutions of ammonium persulfate and ammonium sulfate are moderately stable, which, under the conditions of low controlled supersaturation of the solution and the presence of a sufficient mass of the fluidized bed, allows them to be used in classifying crystallizers to obtain a large-crystalline classified product of good quality.*

**Keywords:** *classifying crystallizer, crystals, solution supersaturation, hydroclassification; mass transfer.*

УДК 614.841:536.46

[0000-0002-9479-669X] **В. О. Ковбаса**

e-mail: victory101@ukr.net

Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля  
Національного університету цивільного захисту України  
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна

## ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ЗОВНІШНІХ УМОВ НА ШВИДКІСТЬ РОЗВИТКУ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ ФТОРОПЛАСТІВ

*Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення суміші, діаметра її зразка, коефіцієнта теплопровідності його оболонки) та зовнішніх умов (підвищені температури нагріву та зовнішні тиски) на швидкість розвитку процесу горіння ущільнених сумішей з металевих паливних, фторопластів і добавок органічних та неорганічних речовин. Знайдено концентраційні межі горіння сумішей, в яких процес їх горіння протікає стабільно та є стійким. Встановлено широкий клас органічних та неорганічних речовин, введення яких у вигляді невеликих добавок (до 10...13 %) у склад сумішей приводить до зменшення швидкості горіння та підвищення стійкості процесу їх горіння до зовнішніх впливів для різних діапазонів зміни технологічних параметрів сумішей. Виявлено також неорганічні речовини, добавки яких, навпаки, призводять до різкого зростання швидкості розвитку процесу горіння сумішей і зниження його стійкості, особливо в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків. Вперше показано, що шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення і природи компонентів, дисперсності металевих паливних, коефіцієнта ущільнення, діаметра зразків сумішей та коефіцієнта теплопровідності оболонок) на стадії їх виготовлення, не змінюючи тактико-технічні показники піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластовмісних сумішей, за допомогою керованої зміни швидкості горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їх бойового застосування) можна попереджати нестійкі, вибухонебезпечні режими його розвитку в умовах зовнішніх термічних впливів, що призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів.*

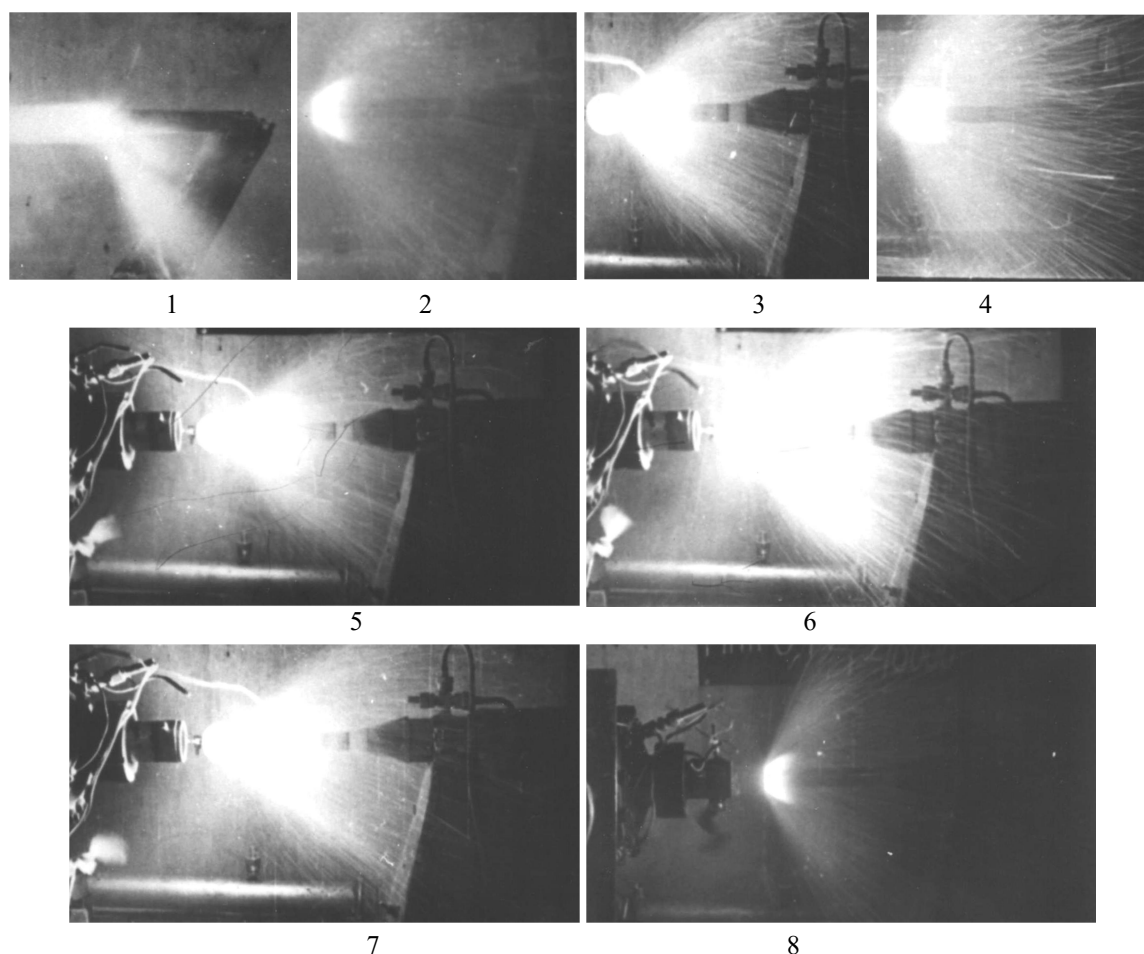
**Ключові слова:** пожежна безпека, піротехнічні суміші, органічні та неорганічні речовини, швидкість горіння, стійкість процесу горіння, зовнішні впливи.

**Вступ.** У народному господарстві та військовій техніці України широко використовуються піротехнічні вироби різного призначення (освітлювальні, сигнальні, трасувальні патрони та снаряди, фейерверочні засоби, елементи ракетно-комічної техніки та ін.) на основі механічно ущільнених сумішей з порошків металевих паливних (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) і фторопластів (Ф-3, Ф-4 та ін.) з добавками органічних (парафін, тіокол, уротропін, стеарин, ЕД-5, СКН-10-1 та ін.) і неорганічних ( $MnO_2$ ,  $Ni_2O_3$ ,  $KMnO_4$ ,  $V_2O_5$ ,  $CuO$ ,  $Cr_2O_3$  та ін.) речовин [1-3].

Зазначені суміші, як й інші піротехнічні суміші, при практичному використанні часто піддаються різним зовнішнім термовпливам (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби, в умовах їх пострілу та польоту, коли металеві корпуси виробів піддаються ударним тер-

мовпливам в умовах надзвукового обдуву потоком повітря тощо), що призводить до передчасного займання зарядів сумішей і розвитку процесу їх горіння в умовах зростання температури нагріву та зовнішнього тиску [4-14]. В результаті відбувається руйнування піротехнічних виробів з утворенням високо-температурних продуктів згоряння, які розлітаються у різні боки і мають пожежну небезпеку для навколишніх об'єктів (рисунк 1).

Для попередження зазначених передчасних пожежонебезпечних руйнувань виробів необхідно мати керовану базу даних по розвитку горіння сумішей, і, в першу чергу, їх швидкостях горіння в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, за допомогою якої оперативно прогнозувати умови виникнення вибухонебезпечних режимів горіння сумішей при їх вимушеному спрацюванні.



**Рисунок 1. Кінокадри загальної картини вимушених пожежонебезпечних руйнувань піротехнічних виробів в умовах інтенсивних зовнішніх термодій на їх поверхні, отриманих на стандартному піротехнічному обладнанні [2, 19]: 1, 2, 3, 4 – локальні джерела тепла (використовувався ІЧ-нагрів виробів кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з застосуванням керованих термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300...1000 К); 5, 6, 7, 8 – поздовжній надзвуковий обдув потоком повітря поверхні виробів зі швидкостями до  $2,0 \cdot 10^3 \dots 2,5 \cdot 10^3$  м/с, що моделює умови запуску та польоту виробів**

На цей момент найбільш докладно досліджено процеси горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей (ущільних сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.) і нітратовмісних окиснювачів ( $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{KNO}_3$  та ін.) у вказаних зовнішніх умовах [15, 17-26]: встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (співвідношення і дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, величини та природи добавки органічних речовин, діаметра заряду суміші та ін.) на залежності швидкості горіння сумішей від підвищених температур нагріву (до 800 К) та зовнішніх тисків (до  $10^7$  Па); розроблено моделі їх горіння у цих умовах для визначення критичних параметрів зовнішніх термічних дій, перевищення яких призводить до вибухового розвитку горіння сумішей і пожежонебезпечного

руйнування виробів; на базі проведених досліджень було розроблено методи попередження цих руйнувань виробів шляхом регулювання технологічних параметрів на стадії виготовлення зарядів сумішей, що дозволяє збільшувати часи спрацьовування виробів в екстремальних умовах експлуатації.

Що стосується досліджуваних піротехнічних сумішей з порошків металевих палих і фторопластів з добавками органічних та неорганічних речовин, то нині аналогічні дослідження для них відсутні.

**Мета та задачі досліджень.** *Мета роботи:* отримання бази даних по швидкостях горіння сумішей в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків для різних значень технологічних параметрів, яка дозволяє оцінювати її допустимі діапазони зміни.

Задачами досліджень є:

- дослідження впливу технологічних параметрів на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних металізованих сумішей на основі фторопластів;
- дослідження впливу зовнішніх умов на швидкість розвитку горіння піротехнічних сумішей з порошків металевих палих, фторопластів та добавок органічних речовин.

**Виклад основного матеріалу.** Зразки піротехнічних сумішей виготовлялись з використанням стандартних методів пресування порошків окиснювачів (фторопласти (Ф-3 та ін.)), металевих палих (Mg, Al та ін.) з добавками органічних та неорганічних речовин (парафін, тіокол, уротропін, стеарин, ЕД-5, СКН-10-1,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  та ін.) [15, 16]. На практиці співвідношення компонентів у сумішах кількісно оцінюється коефіцієнтом надлишку окиснювача, який характеризує ступінь відхилення даної суміші від суміші стехіометричного складу:

$$\alpha = \frac{\xi_{\text{ок}}}{\xi_{\text{м}} \cdot l_c}, \quad (1)$$

де  $\xi_{\text{м}}$ ,  $\xi_{\text{ок}}$  – відносні масові вмісти у суміші відповідно металевих палих та окиснювача;  $l_c$  – стехіометричний коефіцієнт (наприклад, для суміші  $\text{Mg} + \text{Ф-3}$  –  $l_c \approx 0,59$ , а для суміші  $\text{Al} + \text{Ф-3}$  –  $l_c \approx 2,2$  [15, 16]). При цьому суміші з  $\alpha < 1$  вважаються перезбагаченими металевим палим, при  $\alpha > 1$  – перезбагаченими окиснювачем, а у випадку  $\alpha = 1$  суміш є стехіометричною. Густина сумішей характеризується коефіцієнтом ущільнення  $K_v$ , а дисперсність використовуваних промисловістю порошків окиснювачів та металевих палих – середніми розмірами частинок окиснювачів  $d_{\text{ок}}$  (мкм) та металевих палих  $d_{\text{м}}$  (мкм), які розраховувались за прийнятими у піротехнічній промисловості методиками [1-3]. Використовувались зразки сумішей різного діаметра  $D$  (м) без оболонок і з оболонками з різних матеріалів (мідь, сталь 12Х18Н10Т, папір). При цьому товщина оболонок становила  $\Delta = 1,5 \cdot 10^{-3} \dots 2,0 \cdot 10^{-3}$  м, висота зразків  $h = (1,5 \dots 2,0) \cdot D$ .

Дослідження процесів займання і горіння зразків сумішей проводились на стандартному піротехнічному обладнанні [16, 25, 26].

Згідно з проведеними дослідженнями по займанню та горінню піротехнічних сумішей [16, 26] для запалювання зразків сумішей використовувались ніхромові спіралі двох видів,

циліндричні та плоскі, а також навішування зерненого спалахного складу, поміщені у спалахній камері пірогенного типу, сопло якої направлено на поверхню зразка, або розташовані у перкалевому мішечку безпосередньо біля торця зразка. Як зернене навішування використовувались спеціальний піротехнічний склад, димний порошок ДРП або гвинтівковий порошок ВТ. При цьому час запалювання та розповсюдження полум'я по всій поверхні зразка при підпалі спіралями у 1...3 рази вищий, ніж при використанні зерненого навішування.

Швидкість горіння  $u$  (лінійна швидкість, м/с) зразків сумішей вимірювалась за допомогою безконтактних методів, що широко використовуються у піротехніці [17, 26], з використанням стандартних датчиків оптичного та теплового випромінювання, які дозволяють реєструвати початок та закінчення горіння зразка заввишки  $h$ . Тоді середні значення швидкості горіння зразка визначаються за формулою  $u = \frac{h}{\tau}$ , де  $\tau$  – середній час згоряння зразка. Відносна похибка вимірювання  $u$  не перевищувала 5...7 %.

В результаті проведених експериментальних досліджень для робочих діапазонів зміни технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , відносного вмісту органічних та неорганічних речовин  $\varepsilon$ , середнього розміру частинок порошків металевих палих  $d_{\text{м}}$  (мкм) та окиснювача  $d_{\text{ок}}$  (мкм), коефіцієнта ущільнення  $K_v$ ,  $D$  (м) та матеріалу оболонки), а також зовнішніх чинників (температури нагріву  $T_0$  (К), зовнішнього тиску  $P$  (Па)) для сумішей були визначені їх концентраційні межі горіння  $\alpha_{\text{ВМГ}}$  та  $\alpha_{\text{НМГ}}$  ( $\alpha_{\text{ВМГ}}$  – верхня концентраційна межа горіння (максимально припустимий вміст металевих палих у суміші, при якому процес горіння має стійкий характер),  $\alpha_{\text{НМГ}}$  – нижня концентраційна межа горіння (максимальний вміст окиснювача у суміші, при якому процес горіння не затухає)).

**Результати досліджень.** Для знаходження концентраційних меж горіння (меж горіння по  $\alpha$ ): верхніх концентраційних меж горіння  $\alpha_{\text{ВМГ}}$  і нижніх концентраційних меж горіння  $\alpha_{\text{НМГ}}$  ( $\alpha_{\text{ВМГ}} < \alpha < \alpha_{\text{НМГ}}$ ) використовувались перехідні суміші, що складаються з тих самих компонентів, що й основні, але з меншим надлишком металевих палих (при знаходженні  $\alpha_{\text{ВМГ}}$ ) або з його великим вмістом (при знаходженні  $\alpha_{\text{НМГ}}$ ). При цьому

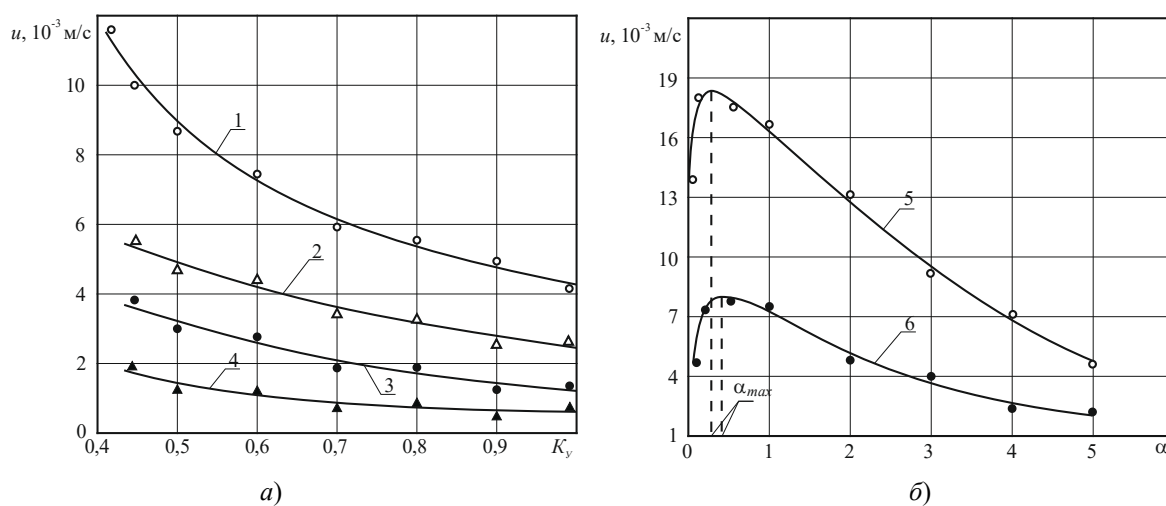
для визначення  $\alpha_{BMГ}$  (аналогічно  $\alpha_{HMG}$ ) використовувалась формула [2, 20]

$$\xi_{BMГ} = \frac{\xi_{M1} + \xi_{M2}}{2}, \quad (2)$$

де  $\xi_{M1}$  – відносний масовий вміст металевого пального, при якому вже не горить жоден з узятих для дослідження зразків;  $\xi_{M2}$  – відносний масовий вміст металевого пального, при якому ще згоряють усі зразки;  $\xi_{BMГ}$  – відносний масовий вміст металевого пального у системі, відповідний  $\alpha_{BMГ}$ .

З метою дослідження загального характеру поведінки залежностей  $u(\alpha, d_m, d_{ок})$  (мкм),  $K_y, D$  (м), матеріал оболонки та  $u(\varepsilon, T_0, P)$  для сумішей при досліджуваних значеннях технологічних параметрів та зовнішніх чинників зазначені залежності досліджувались в діапазоні зміни  $\alpha$ :  $\alpha_{BMГ} < \alpha < \alpha_{HMG}$  (рисунки 2-9), що забезпечувало стабільність процесу горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Експериментальні криві будувалися з використанням сучасних методів регресійного та кореляційного аналізів.



**Рисунок 2.** Залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від коефіцієнта ущільнення ( $\alpha$ ) та коефіцієнта надлишку окиснювача ( $\delta$ ) ( $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м; оболонка паперова;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): а)  $d_m = 135$  мкм; 1 –  $\alpha = 0,6$ ; 2 –  $\alpha = 1,0$ ; 3 –  $\alpha = 1,7$ ; 4 –  $\alpha = 3,0$ ; б) –  $K_y = 0,95...0,96$ ; 5 –  $d_m = 74,5$  мкм;  $\alpha_{max} = 0,21$ ; 6 –  $d_m = 135$  мкм;  $\alpha_{max} = 0,32$ ;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані

**Обговорення результатів.** В результаті проведених експериментальних досліджень впливу коефіцієнта надлишку окиснювача, дисперсності металевого пального, коефіцієнта ущільнення, діаметра та матеріалу оболонки зразка суміші на швидкість горіння встановлено наступні закономірності.

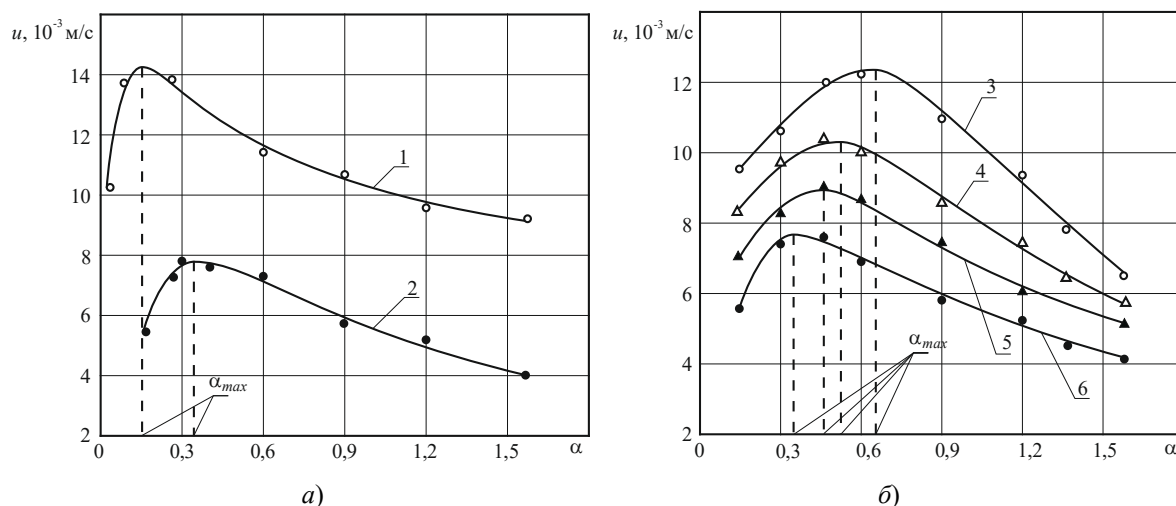
**Суміш Mg + Ф-3.** При збільшенні  $K_y$  від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 разу. Зростання  $\alpha$  від 0,6 до 3,0 приводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 3,2...4,3 разу та послаблення залежності  $u(K_y)$  у 1,4...1,5 разу (рисунк 2, а).

Встановлено такі концентраційні межі горіння сумішей:  $\alpha_{BMГ} = 0,15$  (верхня концентраційна межа горіння – граничний вміст металевого пального у суміші) та  $\alpha_{HMG} = 5,0$  (нижня концентраційна межа горіння – граничний вміст окиснювача у суміші), в межах яких ( $\alpha_{BMГ} < \alpha < \alpha_{HMG}$ ,  $\alpha_{BMГ} < 1$  та  $\alpha_{HMG} > 1$ ) здійснюється стійкий, невибухонебезпечний роз-

виток процесу горіння сумішей (рисунки 2, б, 3, а, 3, б). Криві  $u(\alpha)$  мають максимум  $u_{max}$  при  $\alpha = \alpha_{max}$ , положення якого суттєво залежить від таких важливих технологічних параметрів, як дисперсність металевого пального, діаметр зразка суміші та матеріал його оболонки. Так, при збільшенні  $d_m$  від 74,5 мкм до 135 мкм значення  $\alpha_{max}$  зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача); при цьому швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу, а процес горіння стає більш стабільним, стійким до зовнішніх впливів. Зменшення  $D$  від  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м до  $2,3 \cdot 10^{-2}$  м призводить вже до зменшення  $\alpha_{max}$  від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевого пального) та зростання швидкості горіння суміші в 1,7...1,9 разу, що дестабілізує процес горіння та робить його нестійким при деяких критичних значеннях  $D^*$ : суміші, які запресовані у картонні оболонки з діаметром, меншим  $(1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$  м, не горять (тиск атмосферний,

$d_{ок} < 180...200$  мкм). Перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до помітного збільшення  $\alpha_{max}$  і  $u_{max}$ :  $\alpha_{max} = 0,32$  і  $u_{max} = 7,8 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка паперова);  $\alpha_{max} = 0,45$  і  $u_{max} = 8,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка сталевая (сталь 12Х18Н10Т));  $\alpha_{max} = 0,51$  і  $u_{max} = 10,3 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка мідна);  $\alpha_{max} = 0,63$  і  $u_{max} = 12,3 \cdot 10^{-3}$  м/с (без оболонки), тобто суттєве зміщення  $\alpha_{max}$  відбувається у бік надлиш-

ку окиснювача (більш ніж в 1,5...2 рази), а швидкість горіння суміші збільшується в 1,4...1,7 рази, отже, заміна оболонки на більш теплопровідну (наприклад, паперову на мідну) і, тим більше, відсутність оболонки у зразків сумішей призводить як до суттєвого збільшення швидкості горіння суміші, так і до нестійкості, вибухонебезпечного розвитку процесу її горіння.



**Рисунок 3.** Вплив діаметра (а) та матеріалу оболонки (б) зразка суміші  $Mg + \Phi-3$  на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 135$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): а) оболонка паперова; 1 –  $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$  м;  $\alpha_{max} = 0,18$ ; 2 –  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м;  $\alpha_{max} = 0,32$ ; б)  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м; 3 – зразок без оболонки;  $\alpha_{max} = 0,63$ ; 4 – зразок з мідною оболонкою;  $\alpha_{max} = 0,51$ ; 5 – зразок зі сталевую оболонкою (сталь 12Х18Н10Т);  $\alpha_{max} = 0,45$ ; 6 – зразок з паперовою оболонкою;  $\alpha_{max} = 0,32$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – експериментальні дані

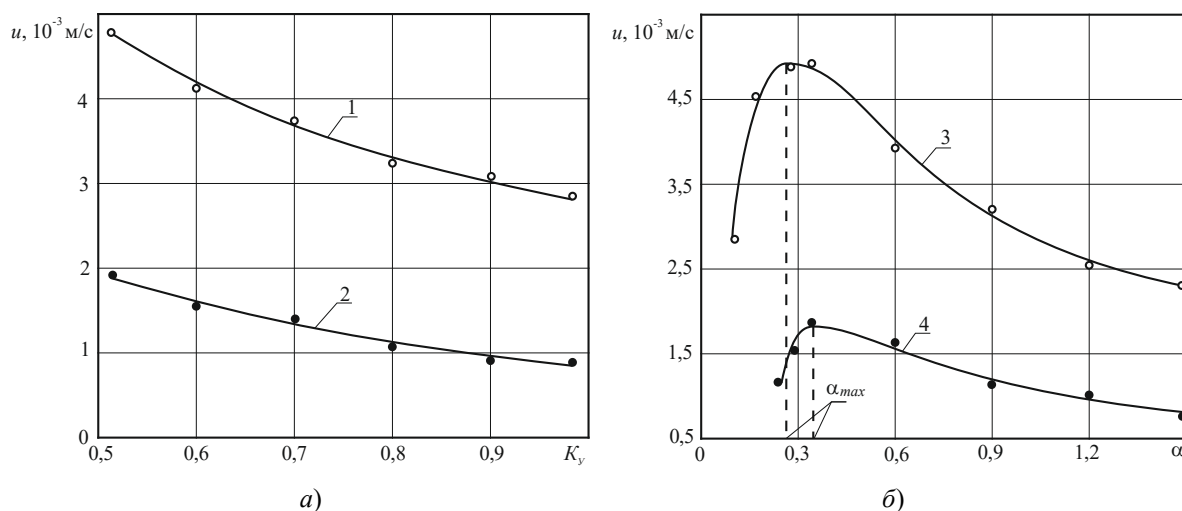
Суміш  $Al + \Phi-3$ . При зростанні  $K_y$  від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей убавляє в 1,6...1,9 рази, а збільшення  $d_m$  від 56 мкм до 179 мкм приводить до зменшення швидкості горіння у 2,5...3,2 рази та послаблення залежності  $u(K_y)$  у 1,2...1,3 рази (рисунок 4, а).

Отримано такі концентраційні межі горіння сумішей:  $\alpha_{ВМГ} = 0,26$  і  $\alpha_{НМГ} = 1,4$ , в межах яких ( $\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$ ) здійснюється стійкий, стабільний розвиток процесу горіння сумішей (рисунки 4, б, 5, а, 5, б). Залежності  $u(\alpha)$  також мають максимум  $u_{max}$  при  $\alpha = \alpha_{max}$ , положення якого суттєво залежить від таких технологічних параметрів: дисперсності металевго пального, діаметра зразка суміші та матеріалу його оболонки. Встановлено, що при збільшенні  $d_m$  від 56 мкм до 179 мкм значення  $\alpha_{max}$  зростають від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 рази, при цьому процес горіння стає більш стабільним і стійким. Зменшення  $D$  від  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м до  $2,3 \cdot 10^{-2}$  м

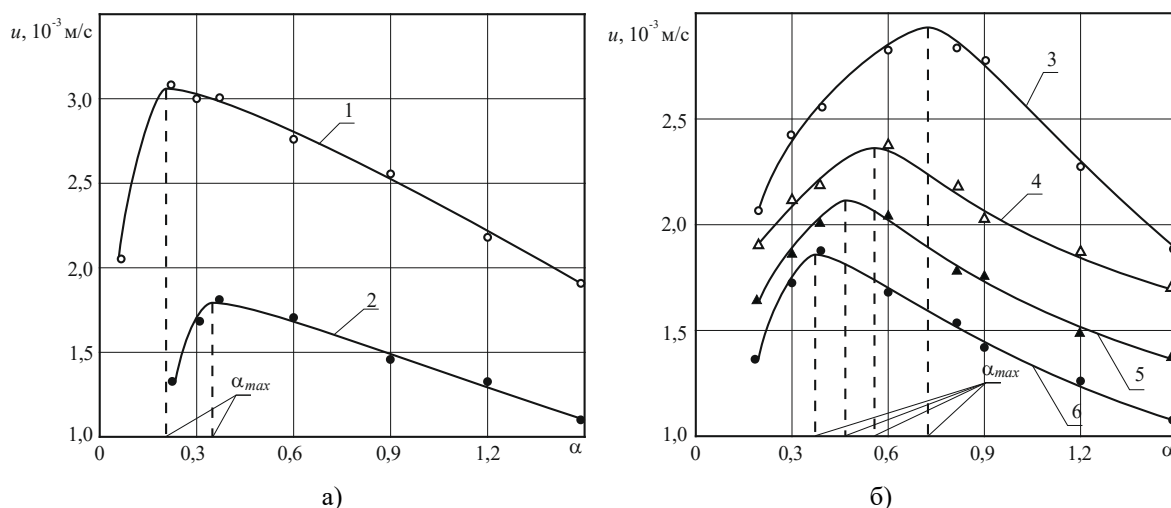
призводить до зменшення  $\alpha_{max}$  від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевго пального) і збільшення швидкості горіння суміші в 1,5...1,7 рази, що зменшує стабільність та стійкість її процесу горіння. Встановлено також критичні значення  $D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$  м (оболонка паперова;  $P = 10^5$  Па;  $d_{ок} < 180...200$  мкм), при менших значеннях  $D$  суміші не горять. Отримано, що заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення  $\alpha_{max}$  та  $u_{max}$ :  $\alpha_{max} = 0,35$  і  $u_{max} = 1,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка паперова);  $\alpha_{max} = 0,49$  і  $u_{max} = 2,1 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка сталевая (сталь 12Х18Н10Т));  $\alpha_{max} = 0,57$  та  $u_{max} = 2,4 \cdot 10^{-3}$  м/с (оболонка мідна);  $\alpha_{max} = 0,69$  і  $u_{max} = 2,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (без оболонки). Таким чином, при переході до більш теплопровідної оболонки (наприклад, від паперової до мідної) або взагалі за відсутності оболонки значення  $\alpha_{max}$  зростають у бік надлишку окиснювача в 1,3...1,8 рази, а швидкість горіння сумішей збільшується в 1,3...1,5 рази, що призводить

до зниження стабільності та підвищення чутливості процесу їх горіння до різного роду

зовнішніх впливів (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та ін.).



**Рисунок 4.** Залежності швидкості горіння сумішей Al + Ф-3 від коефіцієнта ущільнення (а) та коефіцієнта надлишку окиснювача (б) ( $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м; оболонка паперова;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): а)  $\alpha = 1,2$ ; 1 –  $d_m = 56$  мкм; 2 –  $d_m = 179$  мкм; б)  $K_y = 0,95...0,96$ ; 3 –  $d_m = 56$  мкм;  $\alpha_{max} = 0,28$ ; 4 –  $d_m = 179$  мкм;  $\alpha_{max} = 0,35$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$  – експериментальні дані



**Рисунок 5.** Вплив діаметра (а) та матеріалу оболонки (б) зразка суміші Al + Ф-3 на залежність швидкості її горіння від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 179$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $T_0 = 293$  К;  $P = 10^5$  Па): а) оболонка паперова; 1 –  $D = 2,3 \cdot 10^{-2}$  м;  $\alpha_{max} = 0,23$ ; 2 –  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м;  $\alpha_{max} = 0,35$ ; б)  $D = 2,8 \cdot 10^{-2}$  м; 3 – зразок без оболонки;  $\alpha_{max} = 0,69$ ; 4 – зразок з мідною оболонкою;  $\alpha_{max} = 0,57$ ; 5 – зразок зі сталеву оболонкою (сталь 12Х18Н10Т);  $\alpha_{max} = 0,49$ ; 4 – зразок з паперовою оболонкою;  $\alpha_{max} = 0,35$ ;  $\circ$ ,  $\bullet$ ,  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – експериментальні дані

В результаті проведених досліджень впливу підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків на швидкість горіння сумішей Mg, Al + Ф-3 для різних значень коефіцієнта надлишку окиснювача, а також на залежності швидкості горіння сумішей Mg, Al + Ф-3 + добавка від величини та природи органічної або неорганічної речовини встановлено наступні закономірності.

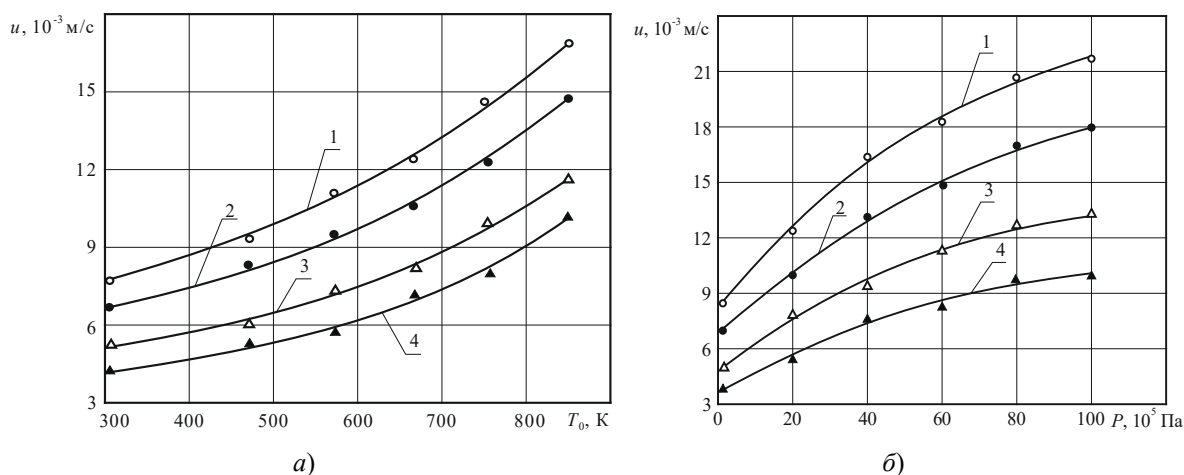
Суміш Mg + Ф-3. При підвищенні  $T_0$  від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей зростає в 1,8...2,7 разу (рисунок 6, а). При цьому зі збільшенням  $\alpha$  від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...2 рази, а залежність  $u(T_0)$  підсилюється в 1,3...1,5 разу (таблиця 1).

При зростанні  $P$  від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па швидкість горіння сумішей збільшується у

2,5...3 рази (рисунк 6, б). Зі збільшенням  $\alpha$  від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується вже у 2,1...3 рази, а залежність  $u(P)$  підсилюється в 1,4...1,6 разу (таблиця 2).

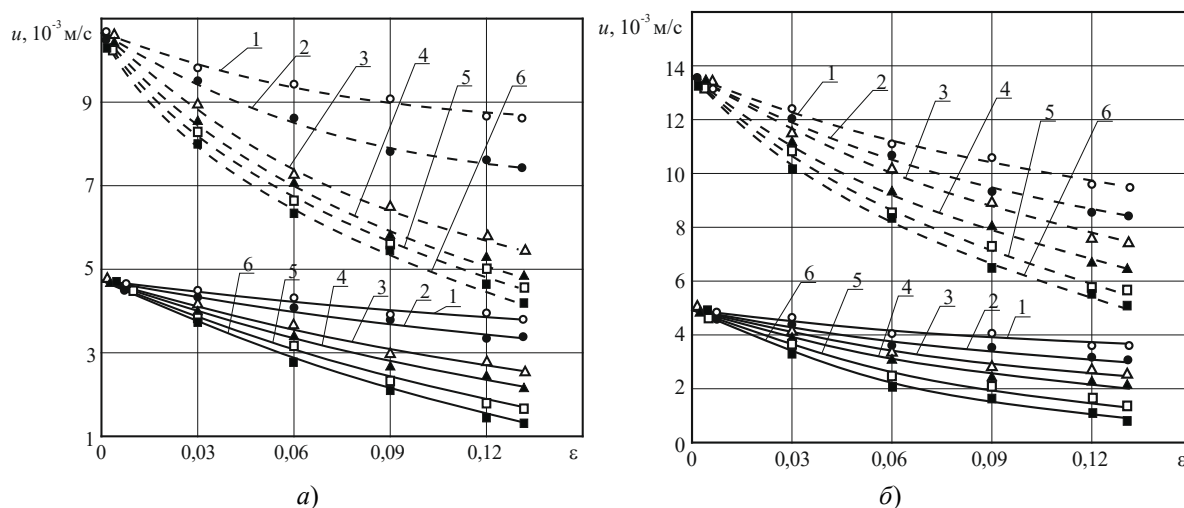
Суміш Mg + Ф-3 + добавка органічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки  $\varepsilon$  від 0,02 до 0,13 при  $T_0 = 293$  К ( $P = 10^5$  Па) приводить до зменшення швид-

кості горіння сумішей в 1,4...3,6 разу (рисунк 7, а): у 3,4...3,6 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,5...2,8 разу (для добавок ЕД-5); у 2,0...2,2 разу (для добавок стеарину); в 1,7...1,9 разу (для добавок уротропіну); в 1,5...1,6 разу (для добавок тіоколу); в 1,3...1,4 разу (для добавок парафіну).



**Рисунок 6.** Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від температури нагріву (а) та зовнішнього тиску (б) ( $d_m = 135$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ): 1 –  $\alpha = 0,6$ ; 2 –  $\alpha = 1,2$ ; 3 –  $\alpha = 2,0$ ; 4 –  $\alpha = 2,5$ ; а)  $P = 10^5$  Па; б)  $T_0 = 293$  К;

○, ●, △, ▲ – експериментальні дані



**Рисунок 7.** Вплив підвищених температур нагріву (а) та зовнішніх тисків (б) на залежності швидкості горіння сумішей Mg + Ф-3 від величини добавок органічних речовин ( $\alpha = 2,0$ ;  $d_m = 135$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ): 1 – парафін; 2 – тіокол; 3 – уротропін; 4 – стеарин; 5 – ЕД-5; 6 – СКН-10-1; а)  $P = 10^5$  Па; — — —  $T_0 = 293$  К; — — — —  $T_0 = 873$  К; б)  $T_0 = 293$  К; — — — —  $P = 10^5$  Па; — — — —  $P = 10^7$  Па; ○, ●, △, ▲, ■, □ – експериментальні дані

При підвищенні  $T_0$  (до 873 К) при  $P = 10^5$  Па швидкість горіння сумішей зменшується вже в 1,3...3,5 разу: у 3,2...3,5 разу (для добавок СКН-10-1); у 2,3...2,7 разу (для добавок ЕД-5); в 1,9...2,1 разу (для добавок

стеарину); в 1,6...1,8 разу (для добавок уротропіну); в 1,4...1,5 разу (для добавок тіоколу); в 1,2...1,3 разу (для добавок парафіну). При зростанні  $P$  (до  $10^7$  Па) при  $T_0 = 293$  К швидкість горіння сумішей зі збільшенням  $\varepsilon$

(до  $\varepsilon = 0,13$ ) також зменшується у 2,3...5,7 разу (рисунк 7, б): у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН-10-1); у 4,2...4,5 разу (для добавок ЕД-5); у 3,4...3,8 разу (для добавок стеарину); у 3,1...3,3 разу (для добавок уротропіну); у 2,7...2,9 разу (для добавок тіоколу); у 2,3...2,5 разу (для добавок парафіну).

Таблиця 1. Залежність відносної швидкості горіння  $\bar{u}$  суміші Mg + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 135$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $P = 10^5$  Па)

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha$  | 0,6 | 1,2 | 2,0 | 2,5 |
| $\bar{u}$ | 1,8 | 2,1 | 2,4 | 2,7 |

Примітка. Відносна швидкість горіння  $\bar{u} = \frac{u|_{T_0=873\text{ К}}}{u|_{T_0=293\text{ К}}}$ , де  $u|_{T_0=293\text{ К}}$  – швидкість горіння при  $T_0 = 293\text{ К}$ ;  $u|_{T_0=873\text{ К}}$  – швидкість горіння при  $T_0 = 873\text{ К}$

Таблиця 2. Залежність відносної швидкості горіння  $\bar{u}$  суміші Mg + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 135$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $T_0 = 293\text{ К}$ )

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha$  | 0,6 | 1,2 | 2,0 | 2,5 |
| $\bar{u}$ | 2,1 | 2,5 | 2,7 | 3,0 |

Примітка. Відносна швидкість горіння  $\bar{u} = \frac{u|_{P=10^7\text{ Па}}}{u|_{P=10^5\text{ Па}}}$ , де  $u|_{P=10^5\text{ Па}}$  – швидкість горіння при  $P = 10^5$  Па;  $u|_{P=10^7\text{ Па}}$  – швидкість горіння при  $P = 10^7$  Па

Вплив досліджуваних добавок органічних речовин у суміш Mg + Ф-3 на залежність  $u(\varepsilon)$  при підвищених  $P$  (до  $10^7$  Па) в 1,5...1,9 разу сильніший, ніж при підвищених  $T_0$  (до 873 К). Крім цього, при підвищених  $T_0$  залежність  $u(\varepsilon)$  послаблюється в 1,3...1,4 разу, а при підвищених  $P$  залежність  $u(\varepsilon)$  вже підсилюється в 1,5...1,8 разу.

Таким чином, як при нормальних зовнішніх умовах ( $T_0 = 293\text{ К}$ ,  $P = 10^5$  Па), так і при підвищених  $T_0$  (до 873 К) та  $P$  (до  $10^7$  Па) органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Mg + Ф-3 розташовуються у вигляді такої послідовності:

СКН-10-1 > ЕД-5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін. (3)

Суміш Al + Ф-3. При зростанні  $T_0$  від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей збільшується в 1,7...2,3 разу (рисунк 8, а). Зі

збільшенням  $\alpha$  від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,4...1,8 разу, а залежність  $u(T_0)$  підсилюється в 1,3...1,4 разу (таблиця 3).

Таблиця 3. Залежність відносної швидкості горіння  $\bar{u}$  суміші Al + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 179$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $P = 10^5$  Па)

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha$  | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,4 |
| $\bar{u}$ | 1,6 | 1,9 | 2,1 | 2,3 |

При збільшенні  $P$  від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па швидкість горіння сумішей зростає в 1,9...2,5 разу (рисунк 8, б). Зі зростанням  $\alpha$  від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,5...1,9 разу, а залежність  $u(P)$  підсилюється в 1,5...1,6 разу (таблиця 4).

Таблиця 4. Залежність відносної швидкості горіння  $\bar{u}$  суміші Al + Ф-3 від коефіцієнта надлишку окиснювача ( $d_m = 179$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ;  $T_0 = 293\text{ К}$ )

|           |     |     |     |     |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| $\alpha$  | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,4 |
| $\bar{u}$ | 1,9 | 2,1 | 2,3 | 2,4 |

Суміш Al + Ф-3 + добавка неорганічної речовини. Збільшення відносного вмісту добавки  $\varepsilon$  від 0,02 до 0,10 при  $T_0 = 293\text{ К}$  ( $P = 10^5$  Па) призводить як до зменшення швидкості горіння сумішей (для добавок CuO та  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), так і до її збільшення (для добавок  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$  та  $\text{V}_2\text{O}_5$ ) (рисунк 9, а): в 1,2 разу (для добавок CuO); в 1,4 разу (для добавок  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); в 1,2 разу (для добавок  $\text{V}_2\text{O}_5$ ); в 1,3 разу (для добавок  $\text{KMnO}_4$ ); в 1,5 разу (для добавок  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ); в 1,7 разу (для добавок  $\text{MnO}_2$ ). Зростання  $T_0$  (до 873 К) при  $P = 10^5$  Па та  $\varepsilon = 0,02...0,10$  призводить до таких змін швидкості горіння сумішей: до зменшення швидкості горіння в 1,3 разу (для добавок CuO) та в 1,5 разу (для добавок  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); до збільшення швидкості горіння в 1,3 разу (для добавок  $\text{V}_2\text{O}_5$ ); в 1,4 разу (для добавок  $\text{KMnO}_4$ ); в 1,6 разу (для добавок  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) та в 1,8 разу (для добавок  $\text{MnO}_2$ ).

При збільшенні  $P$  (до  $10^7$  Па) при  $T_0 = 293\text{ К}$  швидкість горіння сумішей зі зростанням  $\varepsilon$  (до  $\varepsilon = 0,10$ ) також змінюється (рисунк 9, б): зменшується в 1,15 разу (для до-

бавок  $\text{CuO}$ ) та в 1,2 разу (для добавок  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ); збільшується в 1,1 разу (для добавок  $\text{V}_2\text{O}_5$ ); в

1,2 разу (для добавок  $\text{KMnO}_4$ ); в 1,4 разу (для добавок  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ) і в 1,6 разу (для добавок  $\text{MnO}_2$ ).

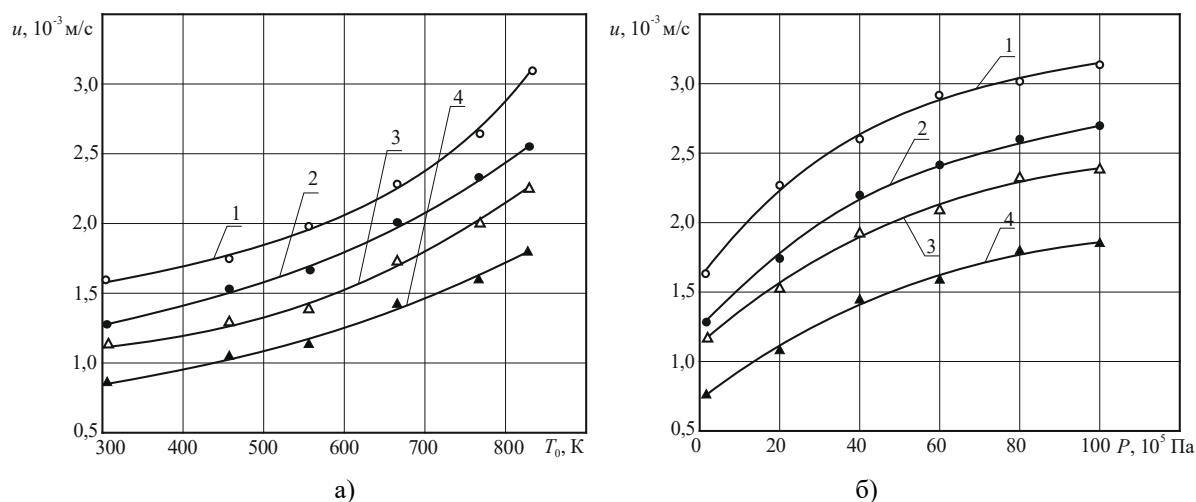


Рисунок 8. Вплив коефіцієнта надлишку окиснювача на залежності швидкості горіння сумішей  $\text{Al} + \Phi\text{-3}$  від температури нагріву (а) та зовнішнього тиску (б) ( $d_m = 179$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ): 1 –  $\alpha = 0,6$ ; 2 –  $\alpha = 0,9$ ; 3 –  $\alpha = 1,2$ ; 4 –  $\alpha = 1,4$ ; а)  $P = 10^5$  Па; б)  $T_0 = 293$  К;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$  – експериментальні дані

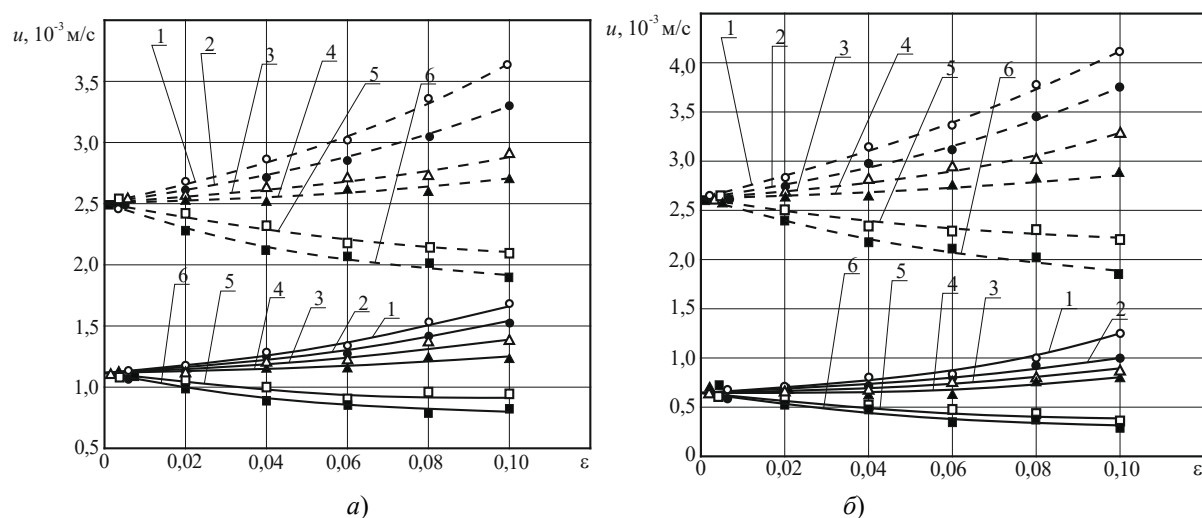


Рисунок 9. Вплив підвищених температур нагріву (а) та зовнішніх тисків (б) на залежності швидкості горіння сумішей  $\text{Al} + \Phi\text{-3}$  від величини добавок неорганічних речовин ( $\alpha = 1,2$ ;  $d_m = 179$  мкм;  $d_{ок} = 110...180$  мкм;  $K_y = 0,95...0,96$ ): 1 –  $\text{MnO}_2$ ; 2 –  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ; 3 –  $\text{KMnO}_4$ ; 4 –  $\text{V}_2\text{O}_5$ ; 5 –  $\text{CuO}$ ; 6 –  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ; а)  $P = 10^5$  Па; — — —  $T_0 = 293$  К; — — —  $T_0 = 873$  К; б)  $T_0 = 293$  К; — — —  $P = 10^5$  Па; — — —  $P = 10^7$  Па;  $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle, \blacksquare$  – експериментальні дані

Таким чином, для сумішей  $\text{Al} + \Phi\text{-3}$  ступінь впливу підвищених  $T_0$  та  $P$  на характер залежностей  $u(\epsilon)$  діаметрально протилежний: при підвищених  $T_0$  (до 873 К) залежність  $u(\epsilon)$  підсилюється в 1,2...1,3 разу, а для підвищених зовнішніх тисків (до  $10^7$  Па) – послаблюється в 1,1...1,2 разу.

Як при нормальних зовнішніх умовах ( $T_0 = 293$  К,  $P = 10^5$  Па), так і при підвищених  $T_0$  (до 873 К) та  $P$  (до  $10^7$  Па) неорганічні ре-

човини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей  $\text{Al} + \Phi\text{-3}$  розташовуються у вигляді наступних послідовностей:

за ступенем зменшення швидкості горіння

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{CuO}; \quad (4)$$

за ступенем зростання швидкості горіння

$$\text{MnO}_2 > \text{Ni}_2\text{O}_3 > \text{KMnO}_4 > \text{V}_2\text{O}_5. \quad (5)$$

На завершення слід відзначити, що на стадії виготовлення піротехнічних металізо-

ваних сумішей на основі фторопластів шляхом регулювання технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, коефіцієнта ущільнення, діаметра зарядів сумішей та матеріалу їх оболонки) можна попереджати передчасний вибухонебезпечний розвиток горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних впливів (наприклад, при пожежах у складських приміщеннях, де зберігаються піротехнічні вироби на основі зазначених сумішей, при їх транспортуванні в умовах зовнішнього нагріву, при термоударних впливах в умовах пострілу та польоту виробів та ін.), що дозволяє підвищувати пожежну безпеку виробів у цих умовах.

**Висновки.** На основі проведених експериментальних досліджень закономірностей впливу технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача  $\alpha$ , коефіцієнта ущільнення  $K_Y$ , середнього розміру частинок металевго пального  $d_m$ , діаметра зразка суміші  $D$  та матеріалу його оболонки (паперова, сталев, мідна)) і зовнішніх умов (підвищених температур нагріву  $T_0$  та зовнішніх тисків  $P$ ) на швидкість розвитку процесу горіння дво- та трикомпонентних сумішей Mg, Al +  $\Phi$ -3 + добавка органічної та неорганічної речовини отримано наступні нові результати.

#### 1. Для сумішей Mg + $\Phi$ -3:

- встановлено верхню концентраційну межу горіння  $\alpha_{ВМГ} = 0,15$  та нижню концентраційну межу горіння  $\alpha_{НМГ} = 5,0$ , в межах яких ( $\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$ ) відбувається стійке, невибухонебезпечне протікання процесу горіння сумішей;
- отримано, що при збільшенні  $K_Y$  від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується у 2,0...2,5 разу; при цьому зі зростанням  $\alpha$  від 0,6 до 3,0 швидкість горіння сумішей зменшується у 3,2...4,3 разу, а залежність  $u(K_Y)$  послаблюється в 1,4...1,5 разу;
- встановлено, що криві  $u(\alpha)$  мають максимум  $u_{max}$  при  $\alpha = \alpha_{max}$ , положення якого суттєво залежить від технологічних параметрів ( $d_m$ ,  $D$  та теплопровідності матеріалу оболонки): при збільшенні  $d_m$  від 74,5 мкм до 135 мкм значення  $\alpha_{max}$  зростають від 0,21 до 0,32 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,3...2,5 разу; зменшення  $D$  від  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м до  $2,3 \cdot 10^{-2}$  м сприяє зменшенню  $\alpha_{max}$  від 0,32 до 0,18 (у бік надлишку металевго пального) та зростанню швидкості горіння суміші в 1,7...1,9 разу; встановлено критичні значення  $D = D^* = (1,8...2,0) \cdot 10^{-2}$  м (для

картонних оболонок), нижче яких суміші вже не горять; перехід від менш теплопровідної оболонки до більш теплопровідної призводить до збільшення  $\alpha_{max}$  та  $u_{max}$  від 0,32 та  $7,8 \cdot 10^{-3}$  м/с (для паперової оболонки), 0,45 та  $8,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (для сталевго оболонки), 0,51 та  $10,3 \cdot 10^{-3}$  м/с (для мідної оболонки), 0,63 та  $12,3 \cdot 10^{-3}$  м/с (без оболонки);

- встановлено, що підвищення  $T_0$  від 293 К до 873 К призводить до зростання швидкості горіння сумішей в 1,8...2,7 разу; при цьому зі збільшенням  $\alpha$  від 0,6 до 2,5 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...2 рази, а залежність  $u(T_0)$  підсилюється в 1,3...1,5 разу;
- отримано, що зі зростанням  $P$  від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па швидкість горіння сумішей збільшується у 2,5...3 рази; при цьому збільшення  $\alpha$  від 0,6 до 2,5 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,1...3 рази та підсилення залежності  $u(P)$  в 1,4...1,6 разу.

#### 2. Для сумішей Al + $\Phi$ -3:

- отримано концентраційні межі горіння сумішей  $\alpha_{ВМГ} = 0,26$  та  $\alpha_{НМГ} = 1,4$ , в межах яких ( $\alpha_{ВМГ} < \alpha < \alpha_{НМГ}$ ) процес їх горіння протікає стабільно і стійко до зовнішніх впливів;
- встановлено, що зі збільшенням  $K_Y$  від 0,45 до 0,98 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,6...1,9 разу, а зростання  $d_m$  від 56 мкм до 179 мкм призводить до зменшення швидкості горіння сумішей у 2,5...3,2 разу та послаблення залежності  $u(K_Y)$  в 1,2...1,3 разу;
- отримано, що залежності  $u(\alpha)$  також мають екстремальний характер з максимумами  $u_{max}$  при  $\alpha = \alpha_{max}$ , положення яких залежить від технологічних параметрів ( $d_m$ ,  $D$  та теплопровідності матеріалу оболонки): зростання  $d_m$  від 56 мкм до 179 мкм призводить до збільшення  $\alpha_{max}$  від 0,28 до 0,35 (у бік надлишку окиснювача), а швидкість горіння суміші зменшується у 2,1...2,4 разу; зі зменшенням  $D$  від  $2,8 \cdot 10^{-2}$  м до  $2,3 \cdot 10^{-2}$  м  $\alpha_{max}$  знижується від 0,35 до 0,23 (у бік надлишку металевго пального), а швидкість горіння збільшується в 1,5...1,7 разу; при цьому встановлено критичні значення  $D = D^* = (1,5...1,7) \cdot 10^{-2}$  м (оболонка паперова), при менших значеннях  $D$  суміші не горять; заміна менш теплопровідної оболонки на більш теплопровідну призводить до збільшення  $\alpha_{max}$  та  $u_{max}$ : від 0,35 та  $1,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (для паперової оболонки), 0,49 та  $2,1 \cdot 10^{-3}$  м/с (для сталевго оболонки), 0,57 та  $2,4 \cdot 10^{-3}$  м/с (для мідної оболонки), 0,69 та  $2,9 \cdot 10^{-3}$  м/с (без

оболонки) та зростання швидкості горіння сумішей в 1,3...1,5 разу;

– отримано, що зі зростанням  $T_0$  від 293 К до 873 К швидкість горіння сумішей збільшується в 1,7...2,3 разу; при цьому збільшення  $\alpha$  від 0,6 до 1,4 призводить до зменшення швидкості горіння сумішей в 1,4...1,8 разу та підсилення залежності  $u(T_0)$  в 1,3...1,4 разу;

– встановлено, що з підвищенням  $P$  від  $10^5$  Па до  $10^7$  Па швидкість горіння сумішей збільшується в 1,9...2,5 разу; зі збільшенням  $\alpha$  від 0,6 до 1,4 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,5...1,9 разу, а залежність  $u(P)$  підсилюється в 1,5...1,6 разу.

3. Для сумішей Mg + Ф-3 + добавка органічної речовини встановлено:

– зі збільшенням відносного вмісту  $\varepsilon$  добавок СКН-10-1, ЕД-5, стеарину, уротропіну, тіоколу та парафіну від 0,02 до 0,13 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,4...3,6 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^5$  Па), в 1,3...3,5 разу (при  $T_0 = 873$  К та  $P = 10^5$  Па) та у 2,3...5,7 разу: у 5,3...5,7 разу (для добавок СКН-10-1); у 4,2...4,5 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^7$  Па); при цьому при підвищенні  $T_0$  до 873 К залежність  $u(\varepsilon)$  послаблюється в 1,3...1,4 разу, а при підвищенні до  $10^7$  Па залежність  $u(\varepsilon)$  вже підсилюється в 1,5...1,8 разу;

– як при нормальних зовнішніх умовах ( $T_0 = 293$  К,  $P = 10^5$  Па), так і при підвищених  $T_0$  та  $P$  органічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Mg + Ф-3 розташовуються у вигляді послідовності: СКН-10-1 > ЕД-5 > стеарин > уротропін > тіокол > парафін.

4. Для сумішей Al + Ф-3 + добавка неорганічної речовини отримано:

– зі збільшенням відносного вмісту  $\varepsilon$  добавок CuO та  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  від 0,02 до 0,10 швидкість горіння сумішей зменшується в 1,2...1,4 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^5$  Па), в 1,3...1,5 разу (при  $T_0 = 873$  К та  $P = 10^5$  Па) і в 1,15...1,2 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^7$  Па);

– зі зростанням відносного вмісту  $\varepsilon$  від 0,02 до 0,10 для добавок  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ ,  $\text{KMnO}_4$  та  $\text{V}_2\text{O}_5$  швидкість горіння збільшується в 1,2...1,7 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^5$  Па), в 1,3...1,8 разу (при  $T_0 = 873$  К та  $P = 10^5$  Па) і в 1,1...1,6 разу (при  $T_0 = 293$  К та  $P = 10^7$  Па); при підвищенні  $T_0$  (до 873 К) залежність  $u(\varepsilon)$  підсилюється в 1,2...1,3 разу, а при підвищенні  $P$  (до  $P = 10^7$  Па) – послаблюється в 1,1...1,2 разу);

– незалежно від  $T_0$  та  $P$ , неорганічні речовини за ступенем їх впливу на швидкість горіння сумішей Al + Ф-3 розташовуються у вигляді послідовностей:  $\text{Cr}_2\text{O}_3 > \text{CuO}$  (зменшення швидкості горіння);  $\text{MnO}_2 > \text{Ni}_2\text{O}_3 > \text{KMnO}_4 > \text{V}_2\text{O}_5$  (зростання швидкості горіння).

5. Вперше показано, що шляхом регулювання технологічних параметрів сумішей (співвідношення та природи компонентів, дисперсності металевих паливних, коефіцієнта ущільнення, діаметра зразків сумішей та коефіцієнта теплопровідності оболонок) на стадії їх виготовлення, не змінюючи тактико-технічні показники піротехнічних виробів на основі металізованих фторопластовмісних сумішей, за допомогою керованої зміни швидкості горіння сумішей (або часу дії виробів в умовах їх бойового застосування) можна попереджати нестійкі, вибухонебезпечні режими його розвитку в умовах зовнішніх термічних впливів, що призводять до передчасного пожежонебезпечного руйнування виробів.

#### Перспективи подальших досліджень.

Надалі планується проведення досліджень з визначення механізму і розробки математичних моделей процесу горіння ущільнених сумішей з порошків металевих паливних, фторопластів і добавок органічних та неорганічних речовин, які широко використовуються у піротехнічному виробництві, в умовах зовнішніх термічних впливів, які дозволяють визначати діапазони зміни швидкостей горіння сумішей залежно від їх технологічних параметрів та зовнішніх умов, перевищення яких призводить до нестійкого вибухонебезпечного розвитку процесу горіння сумішей і, у кінцевому підсумку, до пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів на їх основі.

#### Список використаних джерел

- [1] В. М. Фатєєв, Ю. П. Приходько, та Л. І. Таборов, *Піротехніка*. Київ, Україна: Наукова думка, 2017.
- [2] Звіт про науково-дослідну роботу "Дослідження тенденцій і закономірностей динаміки основних показників статистики пожеж в Україні за територіальним принципом". Київ: УкрНДІЦЗ, 2018.
- [3] C. L. Mader, *Numerical modeling of explosives and propellants*. CRC Press, 2019.
- [4] J. Bai, and L. Yang, "Study on ignition characteristics of pyrotechnics with different

- binders", *Journal of Energetic Materials*, no. 37 (6), pp. 714-728, 2019.
- [5] X. Jia, X. Qi, and X. Zhang, "Ignition behavior and flame structure of multi-layered pyrotechnic systems containing nitrocellulose", *Combustion Science and Technology*, no. 193 (7), pp. 1354-1373, 2021.
- [6] M. Niu, and Q. Wang, "Experimental investigation on the combustion characteristics of composite modified double-base propellant", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, no. 137 (1), pp. 329-336, 2019.
- [7] Y. Xu, Y. Ma, and Q. Liu, "Characterization of energetic material burning rate using an improved laser shadowgraphy technique", *Journal of Propulsion and Power*, no. 34 (2), pp. 360-366, 2018.
- [8] V. Akkerman, and P. Penner, "Detonation performance of ammonium nitrate explosives", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, no. 45 (4), pp. 546-556, 2020.
- [9] Y. Fang, S. Wang, and Y. Zhang, "Combustion behavior of composite propellants containing Al/CuO and ammonium perchlorate", *Combustion Science and Technology*, no. 191 (9), pp. 1742-1757, 2019.
- [10] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Intenauka*, № 5/5799, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [11] О. С. Діброва, О. В. Кириченко, Р. Б. Мотрічук, та В. А. Ващенко, "Закономірності впливу технологічних параметрів на пожежну безпеку піротехнічних нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термічних дій", *Intenauka*, № 5/5798, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.inter-nauka.com>.
- [12] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, та Р. Б. Мотрічук, "Вплив технологічних параметрів на залежності швидкості розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей", на *XI Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси: Черкас. ін-т пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, 2020.
- [13] В. М. Марич, В. В. Ковалишин, та Я. Б. Кирилів, "Оптимізація складу вогнегасних порошків для гасіння магнію", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій*, Черкаси, 2018.
- [14] В. В. Ковалишин, В. М. Марич, Т. М. Войтович, та Б. М. Гусар, "Використання екологічно прийнятних вогнегасних речовин", на *Міжнар. наук.-практ. конф. Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*, ДУБЖД, 2018.
- [15] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, О. С. Барановський, та В. В. Цибулін, "Визначення вмісту високотемпературного конденсату в продуктах згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей при підвищених зовнішніх тисках", *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр.*, вип. 19, с. 323-332, 2018.
- [16] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [17] О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 3, с. 56-67, 2019.
- [18] О. Dibrova, О. Kyrychenko, R. Motrychuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
- [19] Р. Б. Мотрічук, О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, Т. І. Бутенко, Є. П. Кириченко, та В. В. Цибулін, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру та склад продуктів згоряння піротехнічних нітратно-металевих сумішей", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 131-142, 2020.
- [20] Є. Кириченко, "Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металоксидні вироби в умовах пострілу та польоту", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного*

університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація", т. 5, № 2, с. 37-51, 2021.

- [21] Є. П. Кириченко, В. В. Ковалишин, В. М. Гвоздь, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, та В. В. Цибулін, "Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве паливо + оксид металу при зовнішніх термічних діях", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4, с. 68-82, 2021.
- [22] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, О. Дядюшенко, та В. Мельник, "Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 111-121, 2021.
- [23] Є. Кириченко, "Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках", *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України "Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація"*, т. 6, № 1, с. 29-42, 2022.
- [24] Є. Кириченко, В. Гвоздь, В. Ващенко, О. Кириченко, та О. Дядюшенко, "Попередження передчасного спрацювання піротехнічних виробів на основі сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій", *Цивільний захист та пожежна безпека*, № 2 (12), с. 122-130, 2022.
- [25] Є. П. Кириченко, "Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 2, с. 53-63, 2022.
- [26] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin*

*Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.

## References

- [1] V. M. Fateev, Yu. P. Prykhodko, and L. I. Taborov, *Pyrotechnics*. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka, 2017 [in Ukrainian].
- [2] Report on research work "Study of trends and patterns of dynamics of the main indicators of fire statistics in Ukraine on a territorial basis". Kyiv: UkrNDICZ, 2018 [in Ukrainian].
- [3] C. L. Mader, *Numerical modeling of explosives and propellants*. CRC Press, 2019.
- [4] J. Bai, and L. Yang, "Study on ignition characteristics of pyrotechnics with different binders", *Journal of Energetic Materials*, no. 37 (6), pp. 714-728, 2019.
- [5] X. Jia, X. Qi, and X. Zhang, "Ignition behavior and flame structure of multi-layered pyrotechnic systems containing nitrocellulose", *Combustion Science and Technology*, no. 193 (7), pp. 1354-1373, 2021.
- [6] M. Niu, and Q. Wang, "Experimental investigation on the combustion characteristics of composite modified double-base propellant", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, no. 137 (1), pp. 329-336, 2019.
- [7] Y. Xu, Y. Ma, and Q. Liu, "Characterization of energetic material burning rate using an improved laser shadowgraphy technique", *Journal of Propulsion and Power*, no. 34 (2), pp. 360-366, 2018.
- [8] V. Akkerman, and P. Penner, "Detonation performance of ammonium nitrate explosives", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, no. 45 (4), pp. 546-556, 2020.
- [9] Y. Fang, S. Wang, and Y. Zhang, "Combustion behavior of composite propellants containing Al/CuO and ammonium perchlorate", *Combustion Science and Technology*, no. 191 (9), pp. 1742-1757, 2019.
- [10] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Improvement of fire safety of pyrotechnic nitrate-metal mixtures in the conditions of external thermal actions", *Intenauka*, no. 5/5799, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [11] O. S. Dibrova, O. V. Kyrychenko, R. B. Motrichuk, and V. A. Vashchenko, "Regularities of influence of technological parameters on fire safety of pyrotechnic nitrate-titanium

- mixtures in the conditions of external thermal actions", *Intenauka*, no. 5/5798, 2020. [Online]. Available: <http://www.intenauka.com> [in Ukrainian].
- [12] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, and R. B. Motrichuk, "Influence of technological parameters on the dependence of the rate of development of the combustion process of pyrotechnic mixtures", in *Proc. XI Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations*, Cherkasy: Cherkas. in-t pozhazhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya, 2020 [in Ukrainian].
- [13] V. M. Marych, V. V. Kovalyshyn, and Ya. B. Kyryliv, "Optimization of fire extinguishing powders for magnesium extinguishing", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Theory and practice of fire extinguishing and liquidation of emergency situations*, Cherkasy, 2018 [in Ukrainian].
- [14] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, T. M. Voitovych, and B. M. Husar, "Use of environmentally friendly fire extinguishers", in *Proc. Int. Sci. and Pract. Conf. Environmental safety as the basis of sustainable development of society. European experience and perspectives*, DUBZD, 2018 [in Ukrainian].
- [15] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, O. C. Baranovskyi, and V. V. Tsybulin, "Determination of the content of high-temperature condensate in the combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures at elevated external pressures", *Nauka ta vyrobnytstvo: Interuniv. coll. of sci. papers*, iss. 19, pp. 323-332, 2018 [in Ukrainian].
- [16] V. V. Kovalyshyn, V. M. Marych, Y. M. Novitskyi, B. M. Gusar, V. V. Chemetskiy, and O. L. Mirus, "Improvement of a discharge nozzle damping attachment to suppress fires of class D", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 5 (95), pp. 68-76, 2018.
- [17] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the influence of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products based on them", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 3, pp. 56-67, 2019 [in Ukrainian].
- [18] O. Dibrova, O. Kyrychenko, R. Motrichuk, M. Tomenko, and V. Melnyk, "Fire safety improvement of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under external thermal conditions", *Technology audit and production reserves*, no. 1/1(51), pp. 44-49, 2020.
- [19] R. B. Motrichuk, O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, T. I. Butenko, Yu. P. Kyrychenko, and V. V. Tsybulin, "Regularities of influence of technological parameters and external factors on temperature and composition of combustion products of pyrotechnic nitrate-metal mixtures", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 4, pp. 131-142, 2020 [in Ukrainian].
- [20] Ye. Kyrychenko, "Study of the processes of external thermal shock effects on pyrotechnic metal oxide products under the conditions of a shot and flight", *Zbirnyk naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhazhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy "Nadzvychayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya"*, vol. 5, no. 2, pp. 37-51, 2021 [in Ukrainian].
- [21] Ye. P. Kyrychenko, V. V. Kovalyshyn, V. M. Gvozdz, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko, and V. V. Tsybulin, "Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 4, pp. 68-82, 2021 [in Ukrainian].
- [22] Ye. Kyrychenko, V. Gvozdz, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, O. Dyadushenko, and V. Melnyk, "Patterns of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhazhna bezpeka*, no. 2 (12), pp. 111-121, 2021 [in Ukrainian].
- [23] Ye. Kyrychenko, "Investigation of ignition processes and the development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures made of magnesium, aluminum and metal oxide powders at elevated heating temperatures and external pressures", *Zbirnyk*

- naukovykh prats Cherkaskoho instytutu pozhezhnoyi bezpeky im. Heroyiv Chornobylya Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrayiny "Nadzvychni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya", vol. 6, no. 1, pp. 29-42, 2022 [in Ukrainian].*
- [24] Ye. Kyrychenko, V. Gvozd, V. Vashchenko, O. Kyrychenko, and O. Dyadushenko, "Prevention of premature triggering of pyrotechnic products based on mixtures of magnesium, aluminum powders and metal oxides under conditions of external thermal effects", *Tsyvilnyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, no. 2 (12), pp.122-130, 2022 [in Ukrainian].
- [25] Ye. P. Kyrychenko, "Methodology for determining the critical values of the parameters of external thermal effects on pyrotechnic metal oxide products under operating conditions", *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tekhnologichnogo universytetu*, no. 2, pp. 53-63, 2022 [in Ukrainian].
- [26] O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, and S. O. Kolinko, "Investigation of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in the decomposition products of solid pyrotechnic fuels", *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, no. 2 (8), pp. 81-85, 2019.

**V. O. Kovbasa**

e-mail: victory101@ukr.net

Cherkasy Institute of Fire Safety named after Heroes of Chernobyl  
of the National University of Civil Defense of Ukraine  
Onoprienko st., 8, Cherkasy, 18034, Ukraine

#### **INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND EXTERNAL CONDITIONS ON THE SPEED OF DEVELOPMENT OF THE COMBUSTION PROCESS OF PYROTECHNIC METALIZED MIXTURES BASED ON FLUOROPLASTS**

*In order to prevent premature fire-hazardous destruction of products, it is necessary to have a controlled database on the development of combustion of mixtures, and, first of all, on their burning rates under conditions of elevated heating temperatures and external pressures, with the help of which to quickly predict the conditions for the occurrence of explosive modes of combustion of mixtures during their forced activation.*

*At the moment, there are no studies for pyrotechnic mixtures of metal fuel powders and fluoroplastics with additives of organic and inorganic substances of the influence of technological parameters (ratio and dispersion of components, compaction coefficient, amount and nature of additive of organic substances, diameter of the charge of the mixture, etc.) on the dependence of speed combustion of mixtures from elevated heating temperatures (up to 800 K) and external pressures (up to 107 Pa); models of their combustion in these conditions to determine the critical parameters of external thermal actions, the excess of which leads to the explosive development of combustion of mixtures and fire-hazardous destruction of products, and methods of preventing the specified destruction of products by adjusting technological parameters at the stage of manufacturing charges of mixtures have not been developed, which allows to increase the operating times of products in extreme operating conditions.*

*The purpose of the work is to obtain a database on the burning rates of mixtures under conditions of elevated heating temperatures and external pressures for various values of technological parameters, which allows to estimate its permissible ranges of change. The objectives of the research are the study of the influence of technological parameters on the speed of development of the combustion process of pyrotechnic metallized mixtures based on fluoroplastics; study of the influence of external conditions on the speed of combustion of pyrotechnic mixtures made of metal fuel powders, fluoroplastics and organic substance additives.*

*Samples of pyrotechnic mixtures have been made using standard methods for pressing powders of fluoroplastics, metal fuels (Mg, Al, etc.) with additives of organic and inorganic substances. Studies*

*of the processes of ignition and burning of mixture samples have been carried out on standard pyrotechnic equipment.*

*The regularities of the influence of technological parameters (ratio and dispersion of components, mixture compaction coefficient, diameter of its sample, coefficient of thermal conductivity of its shell) and external conditions (increased heating temperature and external pressure) on the speed of development of the combustion process of compacted mixtures of metal fuels, fluoroplastics and additives organic and inorganic substances have been established. Concentration limits of combustion of mixtures are found, within which the process of their combustion is stable. A wide class of organic and inorganic substances, the introduction of which in the form of small additives (up to 10...13%) in the composition of mixtures leads to a decrease in the burning rate and an increase in the resistance of their combustion process to external influences for various ranges of changes in technological parameters of the mixtures, has been established. Inorganic substances, the addition of which, on the contrary, leads to a sharp increase in the rate of development of the mixture combustion process and a decrease in its stability, especially in conditions of elevated heating temperatures and external pressures, have also been detected. It is shown for the first time that by adjusting the technological parameters of the mixtures (the ratio and nature of the components, the dispersion of metal fuels, the compaction coefficient, the diameter of the mixture samples and the coefficient of thermal conductivity of the shells) at the stage of their manufacture, without changing tactical and technical indicators of pyrotechnic products based on metallized fluoroplastic mixtures, with the help of a controlled change in the burning rate of mixtures (or the time of action of products in the conditions of their combat use), it is possible to prevent unstable, explosive modes of its development in conditions of external thermal influences, which lead to premature fire-hazardous destruction of products.*

**Keywords:** *fire safety, pyrotechnic mixtures, organic and inorganic substances, burning speed, stability of burning process, external influences.*

УДК 28.16.067.1.002.5

[0000-0002-9795-7110] **І. В. Косогіна**, канд. техн. наук, доцент  
e-mail: kosoginairyna@gmail.com

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна

## ТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ КЕРАМІЧНИХ МАТРИЦЬ НА ОСНОВІ $\text{Al}_2\text{O}_3$

*Проведено аналіз сучасного стану проблеми застосування керамічних мембран в технології очищення води. Здійснено синтез керамічних матриць різного складу методом сухого пресування з подальшою термообробкою за температур 950 °C та 1100 °C. Досліджено вплив типу та вмісту пороутворювача на пористість синтезованих керамічних матриць. Виявлено, що пористість керамічних матриць суттєво залежить від вмісту гідрокарбонату амонію як пороутворювача в її складі – при вмісті 8 % пористість становила 63,4 %, тоді як при вмісті 16 %  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  – 70,3 %. Зразок керамічної матриці із загальною пористістю 56,22 % з вмістом пороутворювача  $\text{CaCO}_3$  12,5 %, виготовлений за температури спікання 950 °C, продемонстрував достатньо високу ефективність (до 38 %) очищення води від завислих речовин, які надають воді каламутності. Модифікування поверхні такого зразка керамічної матриці за допомогою  $\text{TiO}_2$ , отриманого золь-гель методом, дозволило підвищити ефективність вилучення органічних барвників різного походження у середньому від 10 % до 60 % за умови додаткового опромінення керамічної матриці у процесі фільтрування води.*

**Ключові слова:** керамічні матриці, мембрани, транспортні характеристики, пористість, стічні води.

**Вступ.** Останнім часом для різних галузей промисловості, таких як харчова, фармацевтична, текстильна, нафтохімічна та очищення стічних вод, все частіше почали використовувати мембранні технології із застосуванням полімерних та керамічних мембран.

Перевагою використання полімерних мембран є їх відносно низька вартість та вузький діапазон розподілу пор, а їх недоліком – низька стійкість до дії високих температур, кислотного середовища і схильність до забруднення [1]. У цьому плані керамічні мембрани є перспективнішими, оскільки вони є термічно та хімічно стійкими, легкі в очищенні та мають тривалий строк служби. Додатковою перевагою керамічних мембран, на відміну від полімерних, є їх висока стійкість до біологічного обростання [2]. Однак використання вартісної сировини та висока температура їх виготовлення (>1200 °C) є обмежувачими факторами для індустріалізації керамічних мембран. Як наслідок розробка технології виготовлення керамічних мембран на основі дешевої сировини набуває популярності [3].

При підготовці води з природних джерел різні види керамічних мембран можуть використовуватись окремо на трьох етапах:

- видалення завислих частинок і, як наслідок, усунення каламутності води;
- зменшення кольоровості води, зумовленої наявністю високомолекулярних органічних речовин природного походження (гумусові речовини);
- знезараження води (видалення вірусів та бактерій).

Ефективність зниження каламутності води на керамічних та полімерних мембранах майже однакова, проте керамічні мембрани мають вищу продуктивність та повільніше забиваються. З літературних даних відомо, що 98 % завислих речовин може видалятися керамічно-мембранною фільтрацією за різних умов проведення досліджень [5].

Для видалення частинок, що викликають каламутність води, можуть бути використані керамічні мембрани (часто у поєднанні з коагуляцією), виготовлені з неорганічних матеріалів, наприклад оксиду цирконію, глинозему, оксиду титану, карбиду чи оксиду кремнію, які складаються з декількох шарів, що утворюють асиметричну структуру. В роботі [4] наведено результати дослідження ефективності усунення каламутності води пористими керамічними мембранами на основі SiC з додаванням до складу або невеликої

кількості глини, або золи промислових відходів. У зразки також вводився один із таких пороутворювачів: поліметилметакрилат, полівінілхлорид або графіт. Всі зразки мембран, незалежно від їх пористості, показали результати ефективності видалення ~99 % [4].

Глиноземні мембрани можуть виготовлятися в різних формах з широким діапазоном розмірів пор завдяки застосуванню сумішей оксидів алюмінію ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), силіцію, титану та цинку у різному співвідношенні, що дозволяє створювати контрольовану пористу структуру. Такі мембрани відрізняються простотою, високою міцністю та термостійкістю.  $\text{TiO}_2$  та  $\text{ZrO}_2$  є перспективними матеріалами для виробництва мембран завдяки фотокаталітичним властивостям і хімічній стійкості в різних агресивних середовищах, але вони не є такими популярними, як матеріали на основі оксиду алюмінію. Для створення керамічних мембран також використовують цеоліти, яким притаманна різна морфологія, склад та структура, що впливає на процес фільтрування [6].

Традиційна сировина для виготовлення керамічних мембран, така як оксид титану ( $\text{TiO}_2$ ), кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ), оксид алюмінію ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), карбід кремнію ( $\text{SiC}$ ) та оксид цирконію ( $\text{ZrO}_2$ ), досить вартісна і вимагає високих температур спікання – від  $1300^\circ\text{C}$  до  $1500^\circ\text{C}$  [7]. Середня вартість керамічних мембран на основі оксидів алюмінію та цирконію коливається в межах  $500\text{--}3000\text{ \$}/\text{м}^2$  [8]. Для порівняння – вартість полімерних мембран коливається від  $20\text{ \$}/\text{м}^2$  до  $200\text{ \$}/\text{м}^2$  [6, 9]. На сьогодні вже існують методи виготовлення керамічних мембран із використанням недорогої сировини та із застосуванням більш низьких температур спікання – нижчих  $1200^\circ\text{C}$  [10, 11].

Однією з проблем виготовлення керамічних мембран промислових масштабів є їх висока крихкість та схильність до розтріскування. Для уникнення цієї проблеми наразі виготовляються композитні мембрани, а саме, кераміко-керамічні композити; нанокомпозити з вбудованими наночастинками металів, оксидів металів або нановуглецевих частинок; металокерамічні мембрани; нанокомпозити на основі кераміки та полімерів [6].

Кераміко-керамічні композити складаються з декількох керамічних фаз, наприклад змішаних оксидів  $\text{ZrO}_2$  і  $\text{SiO}_2$ , що збільшує хімічну та механічну стійкість. Нанокомпозити утворюються внаслідок формування наночастинок на поверхні або стінках пор (актив-

ного шару) керамічної мембрани, тобто роль підтримуючого шару відіграють саме керамічні матриці. Наявність наночастинок змінює мікроструктуру (розмір частинок, пористість, розмір пор) і властивості (гідрофільність, стабільність) керамічних мембран. Введення до складу керамічних мембран сполук срібла або  $\text{TiO}_2$  дозволяє надати мембранам антибактеріальних або фотокаталітичних властивостей відповідно. Кераміко-полімерні мембрани являють собою полімерний активний шар, сформований на керамічній матриці, за рахунок чого мембрана має високу пористість, хімічну і термічну стійкість та механічну міцність [6].

В роботах [12, 13] автори пропонують виготовляти керамічні мембрани з сировини на основі промислових відходів, наприклад золи або попелу рисового лушпиння. Керамічні мембрани, які виготовлені з альтернативної сировини, мають високу термічну, хімічну та механічну стабільність, завдяки чому поступово набувають популярності. Такі керамічні мембрани доцільно використовувати для видалення завислих речовин зі стічних вод.

Наразі великий інтерес становить синтез пористих керамічних мембран з підвищеною пористістю та високою ефективністю затримання забруднюючих речовин у процесі фільтрування. Для створення високої пористості можуть бути використані такі пороутворювачі, як алюмінієва пудра [14], тирса, крохмаль, вуглець або органічні сполуки [15, 16]. Зокрема, в роботі [14] автори зосередили свою увагу на виготовленні ізотропних мембран та симетричних плоских металокерамічних матриць для мембран на основі суміші каоліну та алюмінію з відкритою пористістю 28,5 %.

Якісна керамічна мембранна матриця не повинна мати дефектів і мати достатню механічну міцність, відносно правильну форму пор, вузький розподіл розмірів пор, високу відкриту пористість [17]. Методи підготовки плоских і трубчастих керамічних матриць відрізняються. Наприклад, екструзія часто використовується для виготовлення трубчастих матриць, а лиття пастою та метод сухого пресування частіше використовуються для виготовлення плоских матриць [18].

Наразі досить поширеним є додавання до основної сировини зв'язуючих добавок, пластифікаторів, пороутворювачів для отримання матриць з покращеною механічною

міцністю та пористістю. Склад вихідної сировини, спосіб виготовлення і термічна обробка впливають на кінцеву якість керамічних мембран, а саме, на пористість мембрани, розмір пор, хімічну стабільність, міцність на вигин та пропускну здатність мембрани [19, 20].

Основними етапами виготовлення керамічних мембран є вибір відповідної сировини, обробка сировини механічними способами (подрібнення, просіювання, змішування) для отримання однорідної суміші, формування геометрії мембрани і термічна обробка матриці.

Метод пресування є найпростішим і найбільш поширеним для виготовлення плоских керамічних матриць, є економічно ефективним і застосовується для багатотонажного виробництва [21]. Зазвичай керамічні матриці, синтезовані методом порошкового пресування, мають рівномірну пористість та однорідні фізичні властивості за всією площею.

Максимальний тиск пресування обмежується досягненням межі за зміною в структурі виробу [22]. В роботі [23] використання порошку цеоліту як дешевої основи для керамічної мембрани шляхом напівсухого пресування дозволило отримати диски діаметром 30 мм і товщиною 4 мм, сформовані після випалу за різних температур від 800 °C до 1000 °C, з досить високою пористістю (38 %) і рівномірним розподілом пор. В роботі [24] автори використали метод пресування за тиску 25 МПа для синтезу недорогої керамічної матриці на основі каоліну. У роботі [25] метод сухого пресування за тиску 66 МПа був використаний для виготовлення плоских керамічних мембран з каоліну та каоліно-алюмінієвого порошку.

Таким чином, існуючі методики виготовлення керамічних мембранних матриць вимагають застосування високих тисків, а отримані зразки мають низьку пористість, що не дозволяє ефективно застосовувати їх в технології водоочищення. Разом з тим, поєднання технології пресування із використанням сумішей з домішкою пороутворювачів може дозволити знизити робочий тиск пресування та отримати керамічні матриці з високою пористістю.

**Мета та задачі дослідження** Метою дослідження є встановлення транспортних властивостей (пористості) зразків керамічних матриць, виготовлених методом пресування з подальшою термообробкою, і перевірка ефек-

тивності застосування отриманих матриць для видалення з води нерозчинних завислих речовин та розчинних органічних речовин на прикладі барвників різного походження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі дослідження:

- отримати керамічні матриці методом сухого пресування;
- дослідити транспортні характеристики (пористість) отриманих керамічних матриць;
- дослідити вплив вмісту пороутворювача у складі вихідної суміші на пористість зразків керамічних матриць;
- встановити ефективність видалення забрудників, які спричиняють каламутність та кольоровість води, на прикладі спонділової глини (нерозчинні речовини) та розчинних синтетичних барвників (метиленового синього та конго червоного);
- здійснити модифікацію поверхні керамічних матриць  $\text{TiO}_2$ , отриманого золь-гель методом, та перевірити ефективність застосування модифікованих фотокаталітичними речовинами керамічних матриць для вилучення органічних барвників різного походження.

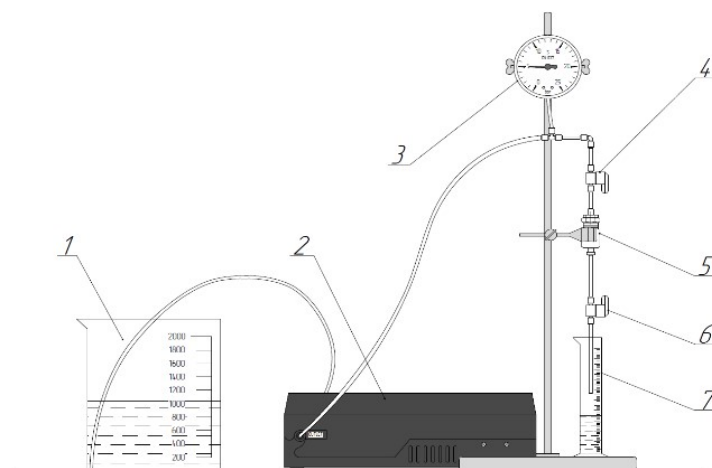
**Матеріали та методики.** Спонділова глина – мінеральна сировина, представлена змішано-шаровими мінералами монтморилоніт-гідрослюдястого типу (34,2...38,0 %), кварцом (21,0...39 %), кальцитом (18,6...40,1 %), слюдою (3,4...3,7%), глауконітом (0,3...1,1%), піритом (0,6...0,9%) та польовим шпатом (0,4-0,8 %). Фракційний склад частинок коливається в межах від 1 мкм до 500 мкм.

Барвник метиленовий синій. Хімічна формула –  $\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$ . Молекулярна маса – 319,85 г/моль. Порошок темно-синього кольору, без запаху, розчинний у воді (3,55 г в 100 см<sup>3</sup>), країна-виробник – Україна.

Барвник конго червоний. Хімічна формула –  $\text{C}_{32}\text{H}_{22}\text{N}_6\text{Na}_2\text{O}_6\text{S}_2$ . Молекулярна маса – 696,665 г/моль. Порошок темно-червоного кольору, без запаху, розчинний у воді (2,5 г в 100 см<sup>3</sup> при 20 °C), країна-виробник – Україна.

В роботі для перевірки ефективності отриманих керамічних матриць використовували три модельні розчини: 1-й з вмістом спонділової глини 100 мг/дм<sup>3</sup>, 2-й та 3-й з вмістом барвника метиленового синього або конго червоного 10 мг/дм<sup>3</sup> відповідно.

Установка, на якій здійснювалась перевірка ефективності застосування керамічних матриць щодо забрудників різної природи, зображена на рисунку 1.



**Рисунок 1. Установка для перевірки ефективності видалення забруднень різної природи мембранними керамічними матрицями [26]:** 1 – ємність з досліджуваною водою, 2 – насос, 3 – манометр, 4 – кран регулювання тиску на вході, 5 – мембранотримач з ущільнювальним кільцем, 6 – кран регулювання витрати на виході, 7 – мірний циліндр

Подачу модельного розчину об'ємом  $100 \text{ см}^3$  здійснювали під тиском 5 бар. Ефективність видалення забруднювачів визначали відповідно до зменшення їх вмісту в очищеній воді порівняно з початковим вмістом у модельній воді. Вміст нерозчинних речовин у зразках води вимірювали за допомогою приладу HACH DR 2800 (кювети зі звичайного скла товщиною 20 мм, довжина хвилі – 430 нм). Вміст органічних розчинних речовин у зразках води визначали за допомогою спектрофотометра UV-5800PC (кювети кварцові товщиною 10 мм), вимірювання проводили за довжини хвилі для модельного розчину з вмістом барвника метиленовий синій 670 нм, а з вмістом барвника конго червоний – 540 нм.

Ступінь видалення нерозчинних завислих речовин, що спричиняють каламутність

води, та розчинних органічних барвників розраховували за формулою

$$E = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \cdot 100, \%$$

де  $C_0$  – концентрація забруднювача в модельних зразках води,  $\text{мг/дм}^3$ ;  $C_n$  – концентрація забруднювача в очищеній воді,  $\text{мг/дм}^3$ .

Матриці керамічних мембран (КМ) виготовляли методом сухого пресування попередньо подрібненої та змішаної у різних співвідношеннях вихідної сировини з подальшим спіканням. Пресування проводили за допомогою ручного гідравлічного преса, тиск пресування – 8 т. Отримані керамічні мембранні матриці мали вигляд дисків діаметром 2,2 см та товщиною 4 мм. Склад зразків керамічних матриць наведено в таблиці 1.

**Таблиця 1. Склад зразків керамічних матриць**

| Зразок  | $\text{Al}_2\text{O}_3$ , % | $\text{SiO}_2$ , % | $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , % | $\text{CaCO}_3$ , % | $\text{SiC}$ , % | $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , % | Крохмаль, % |
|---------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------|------------------|-------------------------------|-------------|
| КМ-1    | 41,7                        | 8,3                | -                             | 12,5                | 8,3              | 8,3                           | 20,9        |
| КМ-2    | 41,7                        | 8,3                | 12,5                          | -                   | 8,3              | 8,3                           | 20,9        |
| КМ-3    | 55                          | 30                 | 10                            | -                   | -                | -                             | 5           |
| КМ-4-8  | 47                          | 10                 | 8                             | -                   | 10               | 10                            | 15          |
| КМ-4-10 | 45                          | 10                 | 10                            | -                   | 10               | 10                            | 15          |
| КМ-4-12 | 43                          | 10                 | 12                            | -                   | 10               | 10                            | 15          |
| КМ-4-14 | 41                          | 10                 | 14                            | -                   | 10               | 10                            | 15          |
| КМ-4-16 | 39                          | 10                 | 16                            | -                   | 10               | 10                            | 15          |

Такі складові, як крохмаль, гідрокарбонат амонію та карбонат кальцію використовували як пороутворювачі.

Після етапу пресування сформовані зразки піддавали термообробці за температури  $950^\circ\text{C}$  для зразків КМ-1, КМ-2 та КМ-3, а

для зразків КМ-4-10 та модифікацій на його основі – 1100 °С з метою підвищення міцності мембранних матриць. Термообробку проводили у муфельній печі, швидкість нагрівання підтримували 5 С/хв для мінімізації теплових навантажень і з поетапним нагріванням та ізотермічною витримкою за 95 °С і 350 °С впродовж 30 хв, а за кінцевих температур 950 °С або 1100 °С – впродовж 60 хв. Після термообробки зразки охолоджували в муфельній печі до кімнатної температури. Отримано круглі керамічні мембранні матриці діаметром 2,2 см (рисунок 2).

Всі зразки після процесу пресування тримали свою форму, крім зразка КМ-3, який механічно не стійкий, тому далі не використовувалися.

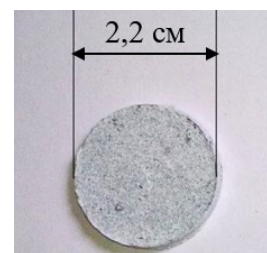


Рисунок 2. Матриці керамічних мембран з діаметром 2,2 см

**Результати досліджень та їх обговорення.** Пористість та вологопоглинання отриманих зразків встановлено за методикою згідно з ДСТУ ISO 5017:2014 [27]. Результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Результати дослідження пористості зразків керамічних матриць

| Зразок  | Водопоглинання, Впогл, % | Пористість відкрита, Пвідкр, % | Пористість загальна, Пзаг, % |
|---------|--------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| КМ-1    | 33,35                    | 50,28                          | 56,22                        |
| КМ-2    | 40,85                    | 54,71                          | 65,38                        |
| КМ-3    | 27,95                    | 42,56                          | 63,40                        |
| КМ-4-8  | 30,47                    | 45,27                          | 64,65                        |
| КМ-4-10 | 31,24                    | 45,34                          | 66,47                        |
| КМ-4-12 | 33,95                    | 46,35                          | 68,03                        |
| КМ-4-14 | 36,49                    | 47,82                          | 70,28                        |
| КМ-4-16 | 33,35                    | 50,28                          | 56,22                        |

Такі складові, як крохмаль, гідрокарбонат амонію та карбонат кальцію використовували як пороутворювачі.

Отримані дані дозволяють стверджувати, що керамічні матриці мають достатньо високу пористість і можуть бути використані у процесах очищення води від завислих речовин та барвників. Використання більш високої кінцевої температури спікання керамічної матриці серії КМ-4 позитивно впливає на пористість та механічну міцність отриманих зразків. Загальна пористість для зразків, витриманих за температури 1100 °С, вища, ніж для отриманих за температури 950 °С.

Також встановлено, що на формування відкритої пористості суттєвий вплив має кількість пороутворювача у складі КМ.

Здійснено перевірку ефективності застосування отриманих керамічних матриць щодо неорганічних нерозчинних забруднень, які надають воді каламутності.

Встановлено (рисунок 3), що найвищу ефективність щодо нерозчинних сполук з до-

сліджуваних керамічних матриць має зразок КМ-1, для якого ступінь вилучення нерозчинних речовин становив 38 %, решта зразків керамічних матриць показали ефективність від 10 % для зразка КМ-2 до 24 % для КМ-4-14 з вмістом пороутворювача 14 %. Така низька ефективність може бути спричинена наявністю в керамічних матрицях пор більшого розміру.

Решта досліджених зразків керамічних матриць продемонстрували дуже низьку ефективність затримання нерозчинних сполук (менше 10 %), що може бути пов'язано з формуванням у процесі спікання малої кількості пор великого діаметра, які виконують роль наскрізних каналів при проходженні рідини в процесі фільтрування. Підвищити ефективність затримання забруднювачів можливо шляхом нанесення селективного шару на керамічні матриці, що дозволить отримати композитну структуру мембран з меншим розміром пор.

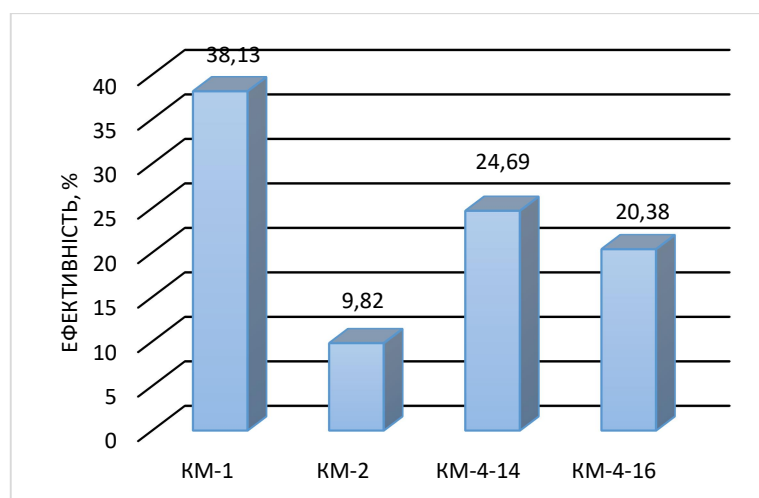


Рисунок 3. Ефективність вилучення нерозчинних завислих речовин зразками керамічних матриць

Проведені дослідження можливості застосування усіх зразків керамічних матриць для видалення розчинних органічних забруднень (барвників) показали їх низьку ефективність – на рівні 5...12 %, незалежно від типу барвника.

З метою підвищення ефективності вилучення барвників здійснено модифікування поверхні KM-1 з вмістом пороутворювача 12,5 %  $\text{CaCO}_3$ , який характеризувався найбіль-

шою ефективністю вилучення нерозчинних неорганічних речовин, за допомогою  $\text{TiO}_2$ , отриманого золь-гель методом [28].

Встановлено, що при модифікації зразків керамічних матриць KM-1 оксидом титану ефективність очищення води з вмістом барвника метиленовий синій суттєво зросла – з 11,9 % до 62 % при додатковому опроміненні поверхні мембрани під час фільтрування води (рисунок 4).

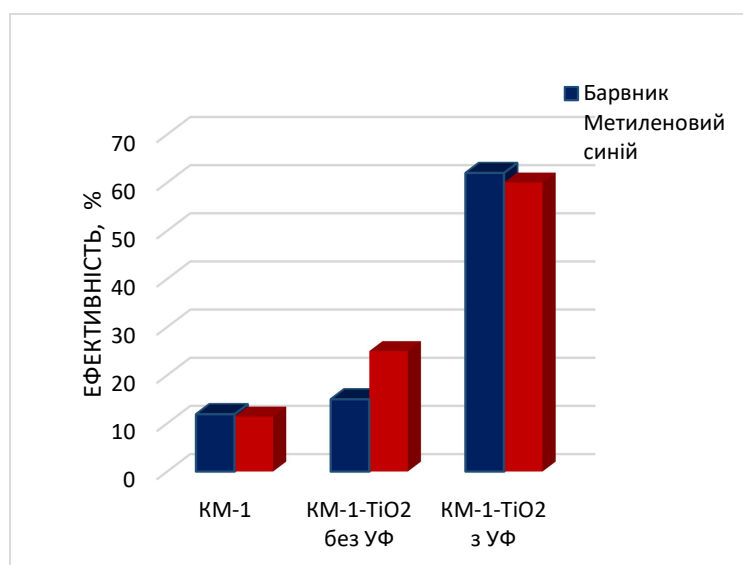


Рисунок 4. Ефективність вилучення барвників зразками керамічних матриць KM-1, немодифікованого та модифікованого  $\text{TiO}_2$  без та з УФ опромінюванням (довжина хвилі – 368 нм)

Підвищення ефективності пов'язане з перебігом під час фільтрування фотокаталітичної деструкції барвника метиленовий синій під дією ультрафіолетового опромінення за рахунок фотокаталітичних властивостей  $\text{TiO}_2$ . Подібна закономірність спостерігається і при вилученні барвника конго червоний –

ультрафіолетове опромінення мембрани (довжина хвилі – 368 нм) дозволяє підвищити ефективність очищення води з 11,4 % до 60 %.

Отже, модифікування поверхні керамічних матриць  $\text{TiO}_2$  дозволяє підвищити ефективність очищення води від органічних барвників не тільки через часткове зменшення

розміру пор керамічної матриці, а й завдяки деструкції барвників у процесі фільтрування за рахунок фотокаталітичної активності модифікованого шару керамічної матриці.

**Висновки.** Отримано керамічні матриці різного складу методом сухого пресування з подальшою термообробкою. Досліджено транспортні характеристики, а саме, пористість отриманих матриць керамічних мембран. Виявлено, що пористість керамічних матриць суттєво залежить від вмісту гідрокарбонату амонію як пороутворювача в складі керамічної матриці. Так, при вмісті 8 % пористість становила 63,4 %, тоді як при вмісті 16 %  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  – 70,3 %.

Зразок КМ-1 із загальною пористістю 56,22 % з вмістом пороутворювача 12,5 %  $\text{CaCO}_3$ , виготовлений за температури спікання 950 °С, виявив достатньо високу ефективність очищення води від завислих речовин, які надають воді каламутності, – на рівні 38 %. Модифікування його поверхні  $\text{TiO}_2$ , отриманого золь-гель методом, дозволило підвищити ефективність вилучення органічних барвників різного походження у середньому до 60 % за умови додаткового опромінення керамічної матриці у процесі фільтрування води.

**Подяка.** Робота виконана в рамках проєкту «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» (реєстраційний номер проєкту 2020.02/0024) Національного фонду досліджень України.

### Список використаних джерел

- [1] A. Serhiienko, I. Brychenko, A. Fedchenko, T. Dontsova, and I. Kosogina, "Transport properties of ceramic membranes based on kaolin", in *Proc. VII Int. Sci. and Tech. Conf. Pure Water. Fundamental, Applied and Industrial Aspects*, Kyiv, 2021, pp. 61-63. [Online]. Available: <http://purewater.net.ua/wp-content/uploads/2022/01/Materiali-CHista-voda-2021.pdf>.
- [2] M. Mulder, "Membrane processes", in *Basic Principles of Membrane Technology*, 1991, pp. 198-280. doi: 10.1007/978-94-017-0835-7\_6.
- [3] S. L. Sandhya Rani, and R. V. Kumar, "Insights on applications of low-cost ceramic membranes in wastewater treatment: A mini-review", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 4, 100149, 2021. doi: 10.1016/j.cscee.2021.100149.
- [4] D. Das, N. Kayal, and M. D. Innocentini, "Permeability behavior and wastewater filtration performance of mullite bonded porous SIC ceramic membrane prepared using coal fly ash as sintering additive", *Transactions of the Indian Ceramic Society*, vol. 80 (3), pp. 186-192, 2021. doi: 10.1080/0371750x.2021.1934122.
- [5] W. Park, S. Jeong, S.-J. Im, and A. Jang, "High turbidity water treatment by ceramic microfiltration membrane: Fouling identification and process optimization", *Environmental Technology & Innovation*, vol. 17, 100578, 2020. doi: 10.1016/j.eti.2019.100578.
- [6] A. O. Serhiienko, T. A. Dontsova, O. I. Yanushkevskaya, S. V. Nahirnyak, and H.-B. Ahmad, "Ceramic membranes: New trends and prospects (short review)", *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, vol. 27 (2), pp. 4-31, 2020. doi: 10.20535/2218-93002722020208817.
- [7] S. Jana, M. Purkait, and K. Mohanty, "Preparation and characterization of low-cost ceramic microfiltration membranes for the removal of chromate from aqueous solutions", *Applied Clay Science*, vol. 47 (3-4), pp. 317-324, 2010. doi: 10.1016/j.clay.2009.11.036.
- [8] J. Kim, and B. Van der Bruggen, "The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: Review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment", *Environmental Pollution*, vol. 158 (7), pp. 2335-2349, 2010. doi: 10.1016/j.envpol.2010.03.024.
- [9] Ceramic flat sheet membrane technology provider - CERAFILTEC How it works. [Online]. Available: <https://www.cerafiltec.com/how-it-works/>. Accessed on: March 21, 2023.
- [10] Ceramics for clean water: Nanofiltration membranes break separation limits - The American Ceramic Society. [Online]. Available: <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/ceramics-for-clean-water-nanofiltration-membranes-break-separation-limits>. Accessed on: March 21, 2023.
- [11] Sub-nano Ceramic Membranes | Research Development | NGK INSULATORS, LTD. [Online]. Available: <https://www.ngk-insulators.com/en/rd/subnano>. Accessed on: March 21, 2023.

- [12] Y. Dong, S. Hampshire, J.-er Zhou et al., "Recycling of fly ash for preparing porous mullite membrane supports with Titania addition", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 180 (1-3), pp. 173-180, 2010. doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.010.
- [13] S. K. Hubadillah, M. H. D. Othman, Z. Harun, A. F. Ismail, M. A. Rahman, and J. Jaafar, "A novel green ceramic hollow fiber membrane (CHFM) derived from rice husk ash as combined adsorbent-separator for efficient heavy metals removal", *Ceramics International*, vol. 43 (5), pp. 4716-4720, 2017. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.12.122.
- [14] M. Issaoui, L. Limousy, B. Lebeau, J. Bouaziz, and M. Fourati, "Design and characterization of flat membrane supports elaborated from kaolin and aluminum powders", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 9 (4), pp. 496-504, 2016. doi: 10.1016/j.crci.2015.10.011.
- [15] Y. Feng, K. Wang, J. Yao, P. A. Webley, S. Smart, and H. Wang, "Effect of the addition of polyvinylpyrrolidone as a pore-former on microstructure and mechanical strength of porous alumina ceramics", *Ceramics International*, vol. 39 (7), pp. 7551-7556, 2013. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.03.007.
- [16] S. Li, C. Wang, and J. Zhou, "Effect of starch addition on microstructure and properties of highly porous alumina ceramics", *Ceramics International*, vol. 39 (8), pp. 8833-8839, 2013. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.04.072.
- [17] B. K. Nandi, R. Uppaluri, and M. K. Purkait, "Identification of optimal membrane morphological parameters during microfiltration of mosambi juice using low cost ceramic membranes", *LWT - Food Science and Technology*, vol. 44 (1), pp. 214-223, 2011. doi: 10.1016/j.lwt.2010.06.026.
- [18] M. Issaoui, and L. Limousy, "Low-cost ceramic membranes: Synthesis, classifications, and applications", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 22 (2-3), pp. 175-187, 2019. doi: 10.1016/j.crci.2018.09.014.
- [19] R. Vinoth Kumar, A. Kumar Ghoshal, and G. Pugazhenth, "Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, vol. 490, pp. 92-102, 2015. doi: 10.1016/j.memsci.2015.04.066.
- [20] K. Suresh, and G. Pugazhenth, "Development of ceramic membranes from low-cost clays for the separation of oil-water emulsion", *Desalination and Water Treatment*, vol. 57 (5), pp. 1927-1939, 2014. doi: 10.1080/19443994.2014.979445.
- [21] P. Monash, G. Pugazhenth, and P. Saravanan, "Various fabrication methods of porous ceramic supports for membrane applications", *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 29 (5), 2013. doi: 10.1515/revce-2013-0006.
- [22] S. Mestre, A. Gozalbo, M. M. Lorente-Ayza, and E. Sánchez, "Low-cost ceramic membranes: a research opportunity for industrial application", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39 (12), pp. 3392-3407, 2019. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.054.
- [23] A. Ma'ruf, M. Agus Salim Al Fatoni, A. Mulyadi Purnawanto, and I. Meilani, "Utilization of natural zeolite for development of ceramic/polymer composite membrane for ultrafiltration", *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 1547-1551, 2019. doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.182.
- [24] S.-C. Huang, C.-T. Huang, S.-Y. Lu, and K.-S. Chou, "Ceramic/polyaniline composite porous membranes", *Journal of Porous Materials*, vol. 6 (2), pp. 153-159, 1999. doi: 10.1023/a:1009687523387.
- [25] M. Issaoui, L. Limousy, B. Lebeau, J. Bouaziz, and M. Fourati, "Design and characterization of flat membrane supports elaborated from kaolin and aluminum powders", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 19 (4), pp. 496-504, 2016. doi: 10.1016/j.crci.2015.10.011.
- [26] І. М. Бриченко, А. О. Федченко, І. В. Косогіна, З. В. Малецький, та Т. А. Донцова, "Синтез та перевірка характеристик керамічних матриць", на VI Міжнар. наук.-практ. конф. Хімічна технологія: наука, економіка та виробництво, (м. Шостка, 23-25 листоп. 2022 р.), с. 148-151. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/Conference\\_book\\_2022.pdf/](https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/Conference_book_2022.pdf/).

- [27] ДСТУ ISO 5017:2014 Вироби вогнетривкі щільні формовані. Метод визначення уявної щільності, відкритої пористості та загальної пористості (ISO 5017:1998, IDT).
- [28] A. Aleksyk, O. Yanushevska, and T. Dontsova, "Synthesis of TiO<sub>2</sub> by solvothermal method and its photocatalytic activity towards bisep-tol and congo red", *Technology Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, vol. 33 (2), pp. 15-24, 2022.  
doi: 10.20535/2218-930022022267096.
- ### References
- [1] A. Serhienko, I. Brychenko, A. Fedchenko, T. Dontsova, and I. Kosogina, "Transport properties of ceramic membranes based on kaolin", in *Proc. VII Int. Sci. and Tech. Conf. Pure Water. Fundamental, Applied and Industrial Aspects*, Kyiv, 2021, pp. 61-63. [Online]. Available: <http://purewater.net.ua/wp-content/uploads/2022/01/Materiali-CHista-voda-2021.pdf>.
- [2] M. Mulder, "Membrane processes", in *Basic Principles of Membrane Technology*, 1991, pp. 198-280.  
doi: 10.1007/978-94-017-0835-7\_6.
- [3] S. L. Sandhya Rani, and R. V. Kumar, "Insights on applications of low-cost ceramic membranes in wastewater treatment: A mini-review", *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 4, 100149, 2021.  
doi: 10.1016/j.cscee.2021.100149.
- [4] D. Das, N. Kayal, and M. D. Innocentini, "Permeability behavior and wastewater filtration performance of mullite bonded porous SIC ceramic membrane prepared using coal fly ash as sintering additive", *Transactions of the Indian Ceramic Society*, vol. 80 (3), pp. 186-192, 2021.  
doi: 10.1080/0371750x.2021.1934122.
- [5] W. Park, S. Jeong, S.-J. Im, and A. Jang, "High turbidity water treatment by ceramic microfiltration membrane: Fouling identification and process optimization", *Environmental Technology & Innovation*, vol. 17, 100578, 2020.  
doi: 10.1016/j.eti.2019.100578.
- [6] A. O. Serhienko, T. A. Dontsova, O. I. Yanushevska, S. V. Nahirnyak, and H.-B. Ahmad, "Ceramic membranes: New trends and prospects (short review)", *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, vol. 27 (2), pp. 4-31, 2020.  
doi: 10.20535/2218-93002722020208817.
- [7] S. Jana, M. Purkait, and K. Mohanty, "Preparation and characterization of low-cost ceramic microfiltration membranes for the removal of chromate from aqueous solutions", *Applied Clay Science*, vol. 47 (3-4), pp. 317-324, 2010.  
doi: 10.1016/j.clay.2009.11.036.
- [8] J. Kim, and B. Van der Bruggen, "The use of nanoparticles in polymeric and ceramic membrane structures: Review of manufacturing procedures and performance improvement for water treatment", *Environmental Pollution*, vol. 158 (7), pp. 2335-2349, 2010.  
doi: 10.1016/j.envpol.2010.03.024.
- [9] Ceramic flat sheet membrane technology provider - CERAFILTEC How it works. [Online]. Available: <https://www.cerafiltec.com/how-it-works/>. Accessed on: March 21, 2023.
- [10] Ceramics for clean water: Nanofiltration membranes break separation limits - The American Ceramic Society. [Online]. Available: <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/ceramics-for-clean-water-nanofiltration-membranes-break-separation-limits>. Accessed on: March 21, 2023.
- [11] Sub-nano Ceramic Membranes | Research Development | NGK INSULATORS, LTD. [Online]. Available: <https://www.ngk-insulators.com/en/rd/subnano>. Accessed on: March 21, 2023.
- [12] Y. Dong, S. Hampshire, J.-er Zhou et al., "Recycling of fly ash for preparing porous mullite membrane supports with Titania addition", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 180 (1-3), pp. 173-180, 2010.  
doi: 10.1016/j.jhazmat.2010.04.010.
- [13] S. K. Hubadillah, M. H. D. Othman, Z. Harun, A. F. Ismail, M. A. Rahman, and J. Jaafar, "A novel green ceramic hollow fiber membrane (CHFM) derived from rice husk ash as combined adsorbent-separator for efficient heavy metals removal", *Ceramics International*, vol. 43 (5), pp. 4716-4720, 2017.  
doi: 10.1016/j.ceramint.2016.12.122.

- [14] M. Issaoui, L. Limousy, B. Lebeau, J. Bouaziz, and M. Fourati, "Design and characterization of flat membrane supports elaborated from kaolin and aluminum powders", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 9 (4), pp. 496-504, 2016.  
doi: 10.1016/j.crci.2015.10.011.
- [15] Y. Feng, K. Wang, J. Yao, P. A. Webley, S. Smart, and H. Wang, "Effect of the addition of polyvinylpyrrolidone as a pore-former on microstructure and mechanical strength of porous alumina ceramics", *Ceramics International*, vol. 39 (7), pp. 7551-7556, 2013.  
doi: 10.1016/j.ceramint.2013.03.007.
- [16] S. Li, C. Wang, and J. Zhou, "Effect of starch addition on microstructure and properties of highly porous alumina ceramics", *Ceramics International*, vol. 39 (8), pp. 8833-8839, 2013.  
doi: 10.1016/j.ceramint.2013.04.072.
- [17] B. K. Nandi, R. Uppaluri, and M. K. Purkait, "Identification of optimal membrane morphological parameters during microfiltration of mosambi juice using low cost ceramic membranes", *LWT - Food Science and Technology*, vol. 44 (1), pp. 214-223, 2011.  
doi: 10.1016/j.lwt.2010.06.026.
- [18] M. Issaoui, and L. Limousy, "Low-cost ceramic membranes: Synthesis, classifications, and applications", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 22 (2-3), pp. 175-187, 2019.  
doi: 10.1016/j.crci.2018.09.014.
- [19] R. Vinoth Kumar, A. Kumar Ghoshal, and G. Pugazhenth, "Elaboration of novel tubular ceramic membrane from inexpensive raw materials by extrusion method and its performance in microfiltration of synthetic oily wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, vol. 490, pp. 92-102, 2015.  
doi: 10.1016/j.memsci.2015.04.066.
- [20] K. Suresh, and G. Pugazhenth, "Development of ceramic membranes from low-cost clays for the separation of oil-water emulsion", *Desalination and Water Treatment*, vol. 57 (5), pp. 1927-1939, 2014.  
doi: 10.1080/19443994.2014.979445.
- [21] P. Monash, G. Pugazhenth, and P. Saravanan, "Various fabrication methods of porous ceramic supports for membrane applications", *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 29 (5), 2013.  
doi: 10.1515/revce-2013-0006.
- [22] S. Mestre, A. Gozalbo, M. M. Lorente-Ayza, and E. Sánchez, "Low-cost ceramic membranes: a research opportunity for industrial application", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39 (12), pp. 3392-3407, 2019.  
doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2019.03.054.
- [23] A. Ma'ruf, M. Agus Salim Al Fatoni, A. Mulyadi Purnawanto, and I. Meilani, "Utilization of natural zeolite for development of ceramic/polymer composite membrane for ultrafiltration", *Materials Today: Proceedings*, vol. 19, pp. 1547-1551, 2019.  
doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.182.
- [24] S.-C. Huang, C.-T. Huang, S.-Y. Lu, and K.-S. Chou, "Ceramic/polyaniline composite porous membranes", *Journal of Porous Materials*, vol. 6 (2), pp. 153-159, 1999.  
doi: 10.1023/a:1009687523387.
- [25] M. Issaoui, L. Limousy, B. Lebeau, J. Bouaziz, and M. Fourati, "Design and characterization of flat membrane supports elaborated from kaolin and aluminum powders", *Comptes Rendus Chimie*, vol. 19 (4), pp. 496-504, 2016.  
doi: 10.1016/j.crci.2015.10.011.
- [26] I. M. Brychenko, A. O. Fedchenko, I. V. Kosoghina, Z. V. Malecjkij, and T. A. Doncova, "Synthesis and verification of characteristics of ceramic matrices", in *VI Int. Sci. and Pract. Conf. Chemical technology: science, economy and production*, (Shostka, Nov. 23-25, 2022), pp. 148-151. [Online]. Available: [https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/Conference\\_book\\_2022.pdf/](https://himtec.sumdu.edu.ua/doc/Conference_book_2022.pdf/) [in Ukrainian].
- [27] DSTU ISO 5017:2014 Fireproof, dense molded products. Method for determining apparent density, open porosity and total porosity (ISO 5017:1998, IDT) [in Ukrainian].
- [28] A. Aleksyk, O. Yanushevska, and T. Dontsova, "Synthesis of TiO<sub>2</sub> by solvothermal method and its photocatalytic activity towards bisep-tol and congo red", *Technology Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, vol. 33 (2), pp. 15-24, 2022.  
doi: 10.20535/2218-930022022267096.

**I. V. Kosogina, Ph. D., Associate Professor**

e-mail: kosoginairyna@gmail.com

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Peremohy ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine

### TRANSPORT PROPERTIES OF CERAMIC MATRICES BASED ON $\text{Al}_2\text{O}_3$

*An analysis of the current state of the problem of the application of ceramic membranes in water treatment technology has been carried out. The advantages of using ceramic membranes for water treatment of various composition and origin from insoluble and soluble pollutants are their high thermal and chemical resistance and resistance to biological fouling, and as a result, a longer service life. The key factors that affect the characteristics of finished ceramic membranes are the selection of appropriate raw materials, the mechanical processing of raw materials to obtain a homogeneous mixture, the formation of the geometry of the membrane, and the heat treatment of the matrix. It has been established that the introduction of a pore former into the initial mixture allows to reduce the working pressure of pressing and to obtain ceramic matrices with high porosity. The synthesis of ceramic matrices of different composition is carried out by the method of dry pressing followed by heat treatment at temperatures of 950 °C and 1100 °C. The effect of the type and content of the pore former on the porosity of the synthesized ceramic matrices is investigated. It is found that the porosity of ceramic matrices significantly depends on the content of ammonium bicarbonate as a pore former in its composition - with a content of 8 %, the porosity is 63.4 %, while with a content of 16 %  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  - 70.3 %. A sample of a ceramic matrix with a total porosity of 56.22 % with a content of pore former  $\text{CaCO}_3$  of 12.5 %, made at a sintering temperature of 950 °C, has demonstrated a sufficiently high efficiency (up to 38 %) of water purification from suspended substances that make water turbid. Surface modification of such a sample of a ceramic matrix with  $\text{TiO}_2$ , obtained by the sol-gel method, has made it possible to increase the efficiency of extraction of organic dyes of various origins from an average of 10 % to 60 %, under the condition of additional UV irradiation of the ceramic matrix in the process of water filtration.*

**Keywords:** ceramic matrices, membranes, transport characteristics, porosity, wastewater.

[0000-0002-1644-7857] **М. В. Костенко**, аспірант,  
[0000-0001-6688-0942] **А. Є. Шевельова**, д-р фіз.-мат. наук, професор,  
e-mail: shevelevaee@dnu.dp.ua  
[0009-0005-2150-1706] **І. Ю. Гергель**, канд. фіз.-мат. наук, доцент,  
[0000-0002-0432-629X] **В. В. Лобода**, д-р фіз.-мат. наук, професор  
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
просп. Гагаріна, 72, м. Дніпро, 49010, Україна

**ПЛОСКА ДЕФОРМАЦІЯ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО БІМАТЕРІАЛУ  
З ДВОМА ЕЛЕКТРОПРОВІДНИМИ ЕЛЕКТРИЧНО ЗАРЯДЖЕНИМИ  
МІЖФАЗНИМИ ТРІЩИНАМИ**

*В роботі розглянуто п'єзоелектричний композит, сформований із двох різнорідних п'єзоелектричних півплощин. Вважається, що на межі поділу матеріалів виникли дві електропровідні тріщини, які можуть мати довільну довжину і відстань між їх вершинами. Допускається також наявність електричного заряду на одній або обох тріщинах. Використано представлення електричних та механічних факторів через кусково-аналітичні функції. З їх використанням проблема зведена до задачі лінійного спряження, для якої представлений точний аналітичний розв'язок. Отримано вирази для механічних та електричних компонент на берегах тріщин та на частинах інтерфейсу поза тріщинами. Побудовано графіки залежності напружень та розкриття тріщин від довжини тріщин та їх сумарного заряду. Показано, що вплив сумарного електричного заряду на тріщині на її розкриття є більш суттєвим, ніж цей вплив на напруження.*

**Ключові слова:** електрод, тріщина між двома матеріалами, аналітичний розв'язок, п'єзоелектричний композит.

**Вступ.** Сучасні актуатори та інші електронні пристрої часто створюються з використанням тонкоплівкових електродів, розташованих між п'єзоелектричними шарами. Такі електроди зазвичай виготовляють із металевого порошку, провідних полімерів тощо. Вони не змінюють механічних властивостей матриць. Відшарування таких електродів може призвести до появи електрично провідних міжфазних тріщин. Отже, якщо актуатор має два електроди на межі розділу п'єзоелектричних матеріалів і вони обидва розшаровуються, то виникає проблема взаємодії двох електрично провідних тріщин, яка анонсована в цій статті. Цей факт підтверджує практичну важливість розглянутої проблеми.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженню пружно-деформівного стану тріщини між двома матеріалами присвячена значна кількість публікацій. Аналізу такої проблеми для випадку зосередженого навантаження на береги тріщини присвячена робота [1]. Значна увага приділялась дослідженню тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами. Зокрема, випадок антиплоского навантаження п'єзоелектричних композитів з

такими тріщинами досліджувався в роботах [2, 3]. При цьому в роботі [2] вивчалась взаємодія електрично провідної тріщини і електрода на межі поділу матеріалів, а в [3] проаналізований вплив напрямку поляризації п'єзоелектричного матеріалу на особливості реалізації моделі зони електричного насичення для електрично провідних тріщин у таких матеріалах. Тріщина між двома п'єзоелектричними матеріалами з однією електрично провідною і двома електрично провідними зонами досліджена в роботі [4].

Системи тріщин між двома п'єзоелектричними матеріалами з різними електричними умовами на їх берегах досліджувались у роботах [5-9]. Зокрема, у [5] метод сингулярних інтегральних рівнянь застосований до аналізу системи тріщин для п'єзоелектричного матеріалу у випадку плоскої задачі, а в [6] вивчалася система тріщин у п'єзоелектричному шарі. Періодичні системи тріщини між двома різнорідними матеріалами досліджувались у роботах [7] та [8] для п'єзоелектричного й ортотропного матеріалів, відповідно. Міжфазна тріщина типу III у п'єзоелектричному біматеріалі вивчалась у

статті [9] з використанням моделі зони електричного пробоя берегів тріщини. Проблема зведена до розв'язання комбінованої крайової задачі лінійного спряження Діріхле-Рімана і визначення на основі цього розв'язку фізично реальних довжин зон пробоя.

Поодинокі тріщини та системи колінеарних тріщин між двома квазікристалами розглянуто в роботі [10], а ще й з урахуванням п'єзоелектричного ефекту – в роботах [11-14]. При цьому в роботі [12] вивчалась одна тріщина, а в [11] – взаємодія двох міжфазних тріщин для випадку антиплоского навантаження. Змішані електричні граничні умови на берегах тріщини між двома п'єзоелектричними квазікристалами під дією антиплоского механічного і плоского електричного навантажень досліджувались у роботі [13], а в статті [14] розглянуто частково роз'єднане кругове включення в одновимірному квазікристалічному матеріалі з п'єзоелектричним ефектом. Досліджено сингулярність у вершині включення та явно виведено коефіцієнти інтенсивності напружень у фоновому та фазонному полях і в електричних зміщеннях.

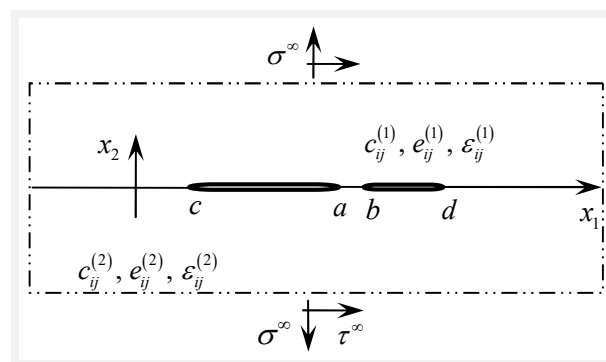
Аналітичний розв'язок для п'єзоелектричного біматеріалу з двома електропроникними тріщинами на межі поділу різних компонент було одержано у роботі [15]. В той же час наразі відсутні результати досліджень стосовно взаємодії двох тріщин з електропроводними берегами при наявності ненульового сумарного заряду їх берегів.

**Метою дослідження** якраз і є аналітичне розв'язання проблеми взаємодії двох електропроводних тріщин між різнорідними п'єзоелектричними матеріалами. При цьому тріщини можуть мати довільну довжину і розташування на межі поділу матеріалів.

**Задачі дослідження** тісно пов'язані з метою дослідження і зводяться до наступного:

- сформулювати задачу лінійного спряження аналітичних функцій для опису сформульованої проблеми;
- побудувати аналітичний розв'язок зазначеної задачі, який має враховувати величину електричних зарядів на тріщинах,
- знайти аналітичні вирази для напружень поза тріщинами, а також їх розкриття і дослідити залежності цих факторів від взаємного розташування тріщин та рівнів їх електричних зарядів.

**Постановка задачі.** Розглянемо дві відкриті електропровідні тріщини  $c \leq x_1 \leq a$ ,  $b < x_1 < d$  на межі поділу двох п'єзоелектричних півпросторів  $x_3 > 0$  і  $x_3 < 0$ , фізичні характеристики яких включають пружні  $c_{ij}$ , п'єзоелектричні  $e_{ij}$  та діелектричні  $\varepsilon_{ij}$  сталі [16]. Вважаємо, що вектор поперечної поляризації колінеарний осі  $x_3$  (рисунк 1). На нескінченності задані рівномірно розподілені нормальне  $\sigma_{33}^\infty$  та дотичне  $\sigma_{13}^\infty$  напруження, а також горизонтальна складова електричного поля  $E_1^\infty$ . Крім того, приймаємо, що на нескінченності діють також напруження  $(\sigma_{11}^\infty)_m$ , які забезпечують виконання умов зчеплення на межі двох середовищ. Тут і надалі індекси  $m=1, 2$  відносяться до верхнього та нижнього півпросторів, відповідно.



**Рисунок 1. Відкриті електрично провідні тріщини  $c \leq x_1 \leq a$ ,  $b < x_1 < d$  на межі  $x_2 = 0$  поділу двох п'єзоелектричних матеріалів**

Будемо вважати, що вектор  $P^\infty = [\sigma^\infty, \tau^\infty, E^\infty]^T$  задає умови на нескінченності. Має місце також відсутність напружень та електричного поля на берегах тріщин і умови неперервності на іншій частині межі поділу матеріалів (біматеріального інтерфейсу).

Отже, граничні умови на різних частинах інтерфейсу мають вигляд

$$\sigma_{33}^{(1)} = \sigma_{33}^{(2)} = 0, \quad \sigma_{13}^{(1)} = \sigma_{13}^{(2)} = 0, \quad E_1^{(1)} = E_1^{(2)} = 0$$

для  $x_1 \in [c, a] \cup [b, d]$ ,  $x_1 \in [b, d]$ , (1)

$$\langle u_1(x_1, 0) \rangle = 0, \quad \langle u_3(x_1, 0) \rangle = 0, \quad \langle D_3(x_1, 0) \rangle = 0, \\ \langle \sigma_{13}(x_1, 0) \rangle = 0, \quad \langle \sigma_{33}(x_1, 0) \rangle = 0$$

$$\text{для } x_1 \notin \{[c, a] \cup [b, d]\}, \quad (2)$$

де вважається, що  $c < a < b < d$ ,  $\langle \cdot \rangle$  означає стрибок відповідної функції при переході через інтерфейс.

Вважаємо також, що ліва та права тріщини мають сумарний електричний заряд  $D_L$  та  $D_R$ , відповідно. Це означає, що

$$\int_c^a \langle D_3(x_1) \rangle dx_1 = D_L, \int_b^d \langle D_3(x_1) \rangle dx_1 = D_R. \quad (3)$$

Крім того, виконуються умови однозначності переміщень при обході контуру тріщини

$$\int_c^a \langle u'_k(x_1) \rangle dx_1 = 0, \int_b^d \langle u'_k(x_1) \rangle dx_1 = 0 \quad k=1,3. \quad (4)$$

**Основні співвідношення для біматеріальної п'єзoeлектричної області.** У роботі [17] для випадку плоскої деформації були отримані такі представлення компонент пружно-деформівного стану на межі поділу матеріалів:

$$ir_{j1}\sigma_{13}^{(1)}(x_1,0) + r_{j3}\sigma_{33}^{(1)}(x_1,0) + ir_{j4}E_1^{(1)}(x_1,0) = F_j^+(x_1) + \gamma_j F_j^-(x_1), \quad (5)$$

$$t_{j1}\langle u'_1(x_1) \rangle + it_{j3}\langle u'_3(x_1) \rangle + t_{j4}\langle D_3(x_1) \rangle = F_j^+(x_1) - F_j^-(x_1) \quad (j=1,3,4), \quad (6)$$

де  $F_j(z)$  – функції, аналітичні в кожній півплощині.

Ці співвідношення забезпечують неперервність  $\sigma_{13}, \sigma_{33}$  і  $E_1$  на інтерфейсі.

Коефіцієнти в (5) є складовими матриці

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} ir_{11} & 1 & ir_{14} \\ ir_{31} & 1 & ir_{34} \\ ir_{41} & 0 & i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\text{де } r_{11} = \frac{s_{31}s_{44} - s_{34}s_{41}}{\delta(s_{11}s_{44} - s_{14}s_{41})}, \quad r_{14} = \frac{s_{11}s_{34} - s_{14}s_{31}}{\delta(s_{11}s_{44} - s_{14}s_{41})},$$

$$r_{31} = -r_{11}, \quad r_{34} = -r_{14}, \quad r_{41} = -\frac{s_{43}}{s_{13}} \text{ є всі дійсними.}$$

Крім того,

$$\delta^2 = \frac{s_{13}s_{41}s_{34} + s_{31}s_{43}s_{14} - s_{31}s_{13}s_{44} - s_{11}s_{34}s_{43}}{s_{33}(s_{11}s_{44} - s_{14}s_{41})} \quad \text{та-}$$

$$\text{кож є дійсним і } \gamma_1 = \frac{1+\delta}{1-\delta}, \quad \gamma_3 = \gamma_1^{-1}, \quad \gamma_4 = 1.$$

Коефіцієнти в (6) можна знайти через компоненти матриці

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}\mathbf{S} \quad (8)$$

за формулами  $t_{j1} = T_{j1}$ ,  $t_{j3} = -iT_{j3}$ ,  $t_{j4} = T_{j4}$ .

Показано, що  $t_{jk}$  ( $j, k=1,3,4$ ) – дійсні і значення  $t_{43} = 0$ .

Коефіцієнти  $s_{ij}$  є складовими матриці

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{13} & S_{14} \\ S_{31} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} is_{11} & s_{13} & is_{14} \\ s_{31} & is_{33} & s_{34} \\ is_{41} & s_{43} & is_{44} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

в якій  $s_{ij}$  дійсні і  $s_{31} = -s_{13}$ ,  $s_{41} = s_{14}$ ,  $s_{43} = -s_{34}$ .

Матриця  $\mathbf{S}$  визначається формулами

$$\mathbf{S} = \mathbf{N}^{(1)} \mathbf{D}^{-1}, \quad \mathbf{D} = \mathbf{M}^{(1)} - \bar{\mathbf{M}}^{(2)} (\bar{\mathbf{N}}^{(2)})^{-1} \mathbf{N}^{(1)}, \quad \text{в яких } k=1, 2 \text{ і}$$

$$\mathbf{M}^{(k)} = \begin{bmatrix} a_{1j}^{(k)} \\ a_{2j}^{(k)} \\ a_{3j}^{(k)} \\ b_{4j}^{(k)} \end{bmatrix}_{j=1,2,3,4}, \quad \mathbf{N}^{(k)} = \begin{bmatrix} b_{1j}^{(k)} \\ b_{2j}^{(k)} \\ b_{3j}^{(k)} \\ -a_{4j}^{(k)} \end{bmatrix}_{j=1,2,3,4} \quad (10)$$

Коефіцієнти  $a_{ij}^{(k)}$  і  $b_{ij}^{(k)}$  є компонентами матриць  $\mathbf{A}^{(k)}$  і  $\mathbf{B}^{(k)}$ , які визначені в [9].

**Формулювання та розв'язання задачі лінійного спряження.** Вибираючи в (5)  $j=1$  і задовольняючи граничним умовам на берегах тріщин, одержуємо

$$F_1^+(x_1) + \gamma_1 F_1^-(x_1) = 0. \quad (11)$$

Беручи до уваги, що для  $x_1 \notin [c, a] \cup [b, d]$  виконується співвідношення  $F_j^+(x_1) = F_j^-(x_1) = F_j(x_1)$ , з рівняння (5) отримуємо

$$(1 + \gamma_j) F_j(x_1) = ir_{j1}\sigma_{13}^{(1)}(x_1,0) + r_{j3}\sigma_{33}^{(1)}(x_1,0) + ir_{j4}E_1^{(1)}(x_1,0) \text{ при } x_1 \rightarrow \infty. \quad (12)$$

Однак, оскільки функції  $F_j(z)$  аналітичні в усій площині, розрізаній вздовж  $[c, a] \cup [b, d]$ , з рівняння (12) отримуємо таку умову на нескінченності

$$F_j(z) \Big|_{z \rightarrow \infty} = \tilde{\sigma}_j - i\tilde{\tau}_j, \quad (13)$$

де

$$\mathcal{G}_k = (1 + \gamma_k), \quad (k=1,3), \quad \mathcal{G}_4 = 2, \quad \tilde{\sigma}_j = \frac{r_{j3}\sigma^\infty}{\mathcal{G}_j},$$

$$\tilde{\tau}_j = -\frac{1}{\mathcal{G}_j} (r_{j1}\tau^\infty + r_{j4}E^\infty).$$

Співвідношення (11) з умовою на нескінченності (13) при  $j=1$  є задачею Гільберта-Рімана, розв'язок якої будемо розшукувати у вигляді [18]:

$$F_1(z) = \frac{P(z)\omega(z)}{\sqrt{(z-c)(z-a)(z-b)(z-d)}}, \quad (14)$$

де  $\varepsilon_1 = \frac{1}{2\pi} \ln \gamma_1$ ,  $P(z) = c_0 z^2 + c_1 z + c_2$ ,

$$\omega(z) = \left( \frac{(z-c)(z-b)}{(z-a)(z-d)} \right)^{i\varepsilon_1}, \quad c_0, c_1, c_2 - \text{довільні}$$

константи, що визначаються з рівняння (13), з умов однозначності переміщень при обході контурів тріщин та з використанням величини сумарного заряду на тріщині.

Інтегруючи (6) по кожній із тріщин і враховуючи (3) та (4), отримуємо

$$\int_c^a \{F_1^+(x_1) - F_1^-(x_1)\} dx_1 = t_{14} D_L, \\ \int_b^d \{F_1^+(x_1) - F_1^-(x_1)\} dx_1 = t_{14} D_R. \quad (15)$$

Враховуючи, що  $F_1^-(x_1) = -\gamma_1^{-1} F_1^+(x_1)$  і підставляючи (14) в (15), одержуємо

$$\int_c^a \frac{P(t)}{\sqrt{(t-c)(t-a)(t-b)(t-d)}} \omega(t) dt = -\tilde{D}_L, \quad (16)$$

$$\int_b^d \frac{P(t)}{\sqrt{(t-c)(t-a)(t-b)(t-d)}} \omega(t) dt = \tilde{D}_R, \quad (17)$$

де  $\tilde{D}_L = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + 1} t_{14} D_L$ ,  $\tilde{D}_R = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 + 1} t_{14} D_R$ .

Ці співвідношення можна представити у вигляді:

$$c_0 I_2 + c_1 I_1 + c_2 I_0 = \tilde{D}_L, \\ c_0 \tilde{I}_2 + c_1 \tilde{I}_1 + c_2 \tilde{I}_0 = \tilde{D}_R, \quad (18)$$

де

$$I_k = \int_c^a R(t) dt, \quad \tilde{I}_k = \int_b^d R(t) dt, \quad (19)$$

$$\sigma_{33}^{(1)}(x_1, 0) = \begin{cases} \operatorname{Re} \left[ \frac{(1+\gamma_1)P(x_1)}{\sqrt{(x_1-c)(x_1-a)(x_1-b)(x_1-d)}} \omega(x_1) \right], & x_1 > d \cup x_1 < -c \\ -\operatorname{Re} \left[ \frac{(1+\gamma_1)P(x_1)}{\sqrt{(x_1-c)(x_1-a)(x_1-b)(x_1-d)}} \omega(x_1) \right], & a < x_1 < b \end{cases}, \quad (22)$$

$$\langle u_3'(x_1, 0) \rangle = \frac{1+\gamma_1}{t_{13}\sqrt{\gamma_1}} \begin{cases} \frac{\operatorname{Re}[P(x_1)]\cos[\alpha_1(x_1)] - \operatorname{Im}[P(x_1)]\sin[\alpha_1(x_1)]}{\sqrt{(x_1-c)(a-x_1)(b-x_1)(d-x_1)}}, & x_1 \in (c, a) \\ -\frac{\operatorname{Re}[P(x_1)]\cos[\alpha_2(x_1)] + \operatorname{Im}[P(x_1)]\sin[\alpha_2(x_1)]}{\sqrt{(x_1-c)(a-x_1)(b-x_1)(d-x_1)}}, & x_1 \in (b, d) \end{cases}, \quad (23)$$

$$R(t) = \frac{t^k \omega(t)}{\sqrt{(t-c)(t-a)(t-b)(t-d)}}.$$

Розкладаючи функцію  $F_1(z)$  в ряд при  $z \rightarrow \infty$  і розглядаючи коефіцієнт цього розкладення при  $z^0$ , з рівняння (13) одержуємо:

$$c_0 = \tilde{\sigma}_1 - i\tilde{\tau}_1. \quad (20)$$

Із системи (18) знаходимо

$$c_1 = [c_0(\tilde{I}_2 I_0 - I_2 \tilde{I}_0) - \tilde{D}_R I_0 + \tilde{D}_L \tilde{I}_0] / D, \\ c_2 = [c_0(\tilde{I}_1 I_2 - I_1 \tilde{I}_2) - \tilde{D}_L \tilde{I}_1 + \tilde{D}_R I_1] / D, \quad (21)$$

де  $D = I_1 \tilde{I}_0 - \tilde{I}_1 I_0$ .

**Нормальне напруження поза тріщиною.** Враховуючи, що  $F_1^+(x_1) = F_1^-(x_1) = F_1(x_1)$  для  $x_1 \notin [c, a]$  і  $x_1 \notin [b, d]$ , на основі формули (5) одержуємо

$$ir_{j1}\sigma_{13}^{(1)}(x_1, 0) + r_{j3}\sigma_{33}^{(1)}(x_1, 0) + \\ + ir_{j4}E_1^{(1)}(x_1, 0) = (1+\gamma_j)F_j^+(x_1) \quad (j=1, 3, 4).$$

З цієї формули, враховуючи, що  $r_{13} = 1$ , для  $j=1$  одержуємо представлення (22) для  $\sigma_{33}^{(1)}(x_1, 0) = (1+\gamma_1)\operatorname{Re}[F_1^+(x_1)]$ .

**Розкриття тріщин.** На основі формули (6) маємо

$$t_{13}\langle u_3'(x_1, 0) \rangle = \operatorname{Im}[F_j^+(x_1) - F_j^-(x_1)].$$

Враховуючи далі співвідношення  $F_1^-(x_1) = -\frac{1}{\gamma_1} F_1^+(x_1)$  для  $x_1 \in [c, a] \cup [b, d]$ ,

яке випливає з (11), рівність  $(-1)^{i\varepsilon_1} = \sqrt{\gamma_1}$  та формулу (14), одержуємо представлення (23) для  $\langle u_3'(x_1, 0) \rangle$ .

$$\text{де } \alpha_1(x_1) = \varepsilon_1 \ln \left( \frac{(x_1 - c)(b - x_1)}{(d - x_1)(a - x_1)} \right), \quad \alpha_2(x_1) = \left[ \varepsilon_1 \ln \left( \frac{(x_1 - c)(x_1 - b)}{(d - x_1)(x_1 - a)} \right) \right].$$

**Результати досліджень.** Розв'язки, що знайдені в попередніх розділах, представляються досить простими аналітичними формулами. Завдяки цьому чисельний аналіз полягає лише в графічній ілюстрації цих формул. Для його проведення використовувались різні довжини тріщин та відстані між

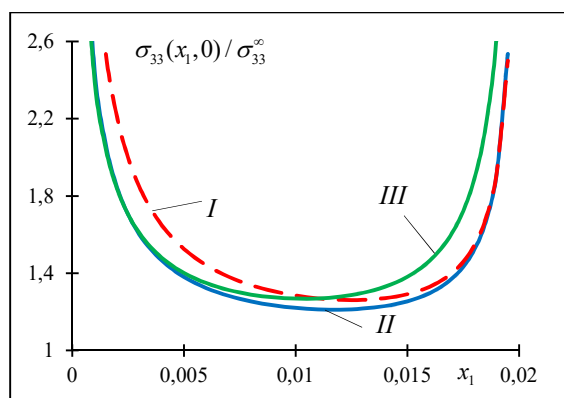
ними, різні механічні та електричні навантаження.

Розглядався біматеріал, складений з п'єзоелектричних компонент PZT-4 (верхній) та PZT-5H (нижній). Механічні, п'єзоелектричні та діелектричні константи цих матеріалів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Фізичні константи п'єзоелектричних матеріалів PZT-4 та PZT-5H

| Матеріал | $c_{11}$             | $c_{12}$ | $c_{13}$ | $c_{33}$ | $c_{44}$                 | $e_{15}$ | $e_{13}$ | $e_{33}$                                               | $\alpha_{11}$ | $\alpha_{33}$ |
|----------|----------------------|----------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|--------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|          | $10^{10} \text{ Па}$ |          |          |          | $\text{Кл} / \text{м}^2$ |          |          | $10^{-10} \cdot \text{Кл} / (\text{В} \cdot \text{м})$ |               |               |
| PZT-4    | 13.9                 | 7.78     | 7.43     | 11.3     | 2.56                     | 13.4     | -6.98    | 13.8                                                   | 60            | 54.7          |
| PZT-5H   | 12.6                 | 5.5      | 5.3      | 11.7     | 3.53                     | 17       | -6.50    | 23.3                                                   | 151           | 130           |

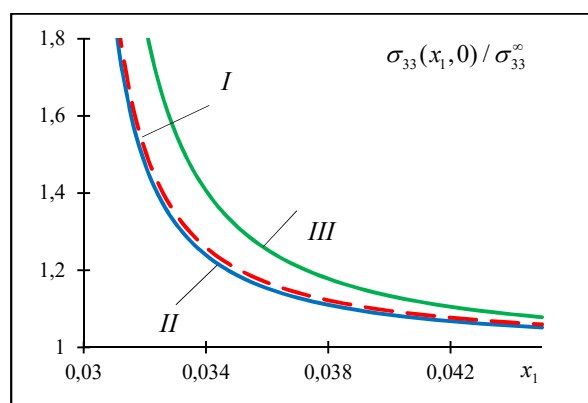
На рисунку 2 зображено графіки зміни нормального напруження  $\sigma_{33}(x_1, 0) / \sigma_{33}^\infty$  на проміжку між вершинами тріщин  $a = 0$  і  $b = 0.02 \text{ м}$  для  $\sigma_{33}^\infty = 10^7 \text{ Па}$ ,  $\sigma_{13}^\infty = 0$ ,  $c = -0.02 \text{ м}$ ,  $d = 0.03 \text{ м}$  та різних значень сумарного електричного заряду на тріщинах. Лінія I відповідає  $D_L = D_R = 0$ , лінія II –  $D_L = 3 \times 10^{-3} \text{ Кл} / \text{м}$ ,  $D_R = 0$  і III –  $D_L = 0$ ,  $D_R = 3 \times 10^{-3} \text{ Кл} / \text{м}$ .



Рисунку 2. Варіація нормального напруження  $\sigma_{33}(x_1, 0) / \sigma_{33}^\infty$  на проміжку між вершинами тріщин

На рисунку 3 зображено графіки зміни нормального напруження  $\sigma_{33}(x_1, 0) / \sigma_{33}^\infty$  на продовженні правої вершини тріщини  $[b, d]$ . Координати вершин тріщин, навантаження і

позначення кривих – ті самі, що і на рисунку 2.

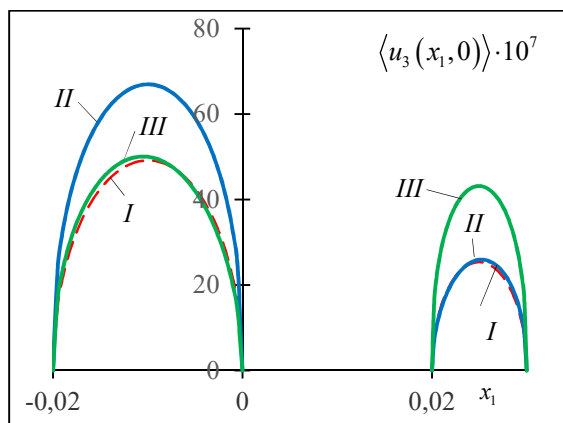


Рисунку 3. Зміна нормального напруження  $\sigma_{33}(x_1, 0) / \sigma_{33}^\infty$  на продовженні правої тріщини

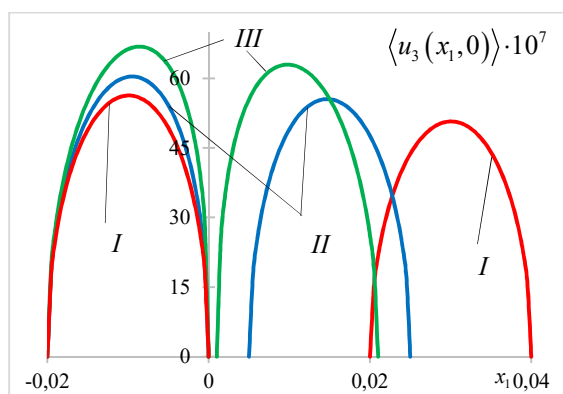
На рисунку 4 зображено графіки розкриття тріщин, отримані при тих самих значеннях координат вершин тріщин і навантажень, що й на двох попередніх рисунках. Навантаження і позначення кривих – ті самі, що й на рисунку 2. Лінію I побудовано для  $D_L = D_R = 0$ , II – для  $D_L = 3 \times 10^{-3} \text{ Кл} / \text{м}$ ,  $D_R = 0$  і III – для  $D_L = 0$ ,  $D_R = 3 \times 10^{-3} \text{ Кл} / \text{м}$ .

На рисунку 5 зображено графіки розкриття тріщин, отримані при  $\sigma_{33}^\infty = 10^7 \text{ Па}$ ,  $\sigma_{13}^\infty = 0$ ,  $D_L = 1 \times 10^{-3} \text{ Кл} / \text{м}$ ,  $D_R = 0$  та різних відстанях між тріщинами. Всі лінії побудовано для  $c = -0.02 \text{ м}$ ,  $a = 0$  і довжини правої тріщини, рівної  $0.02 \text{ м}$ . При цьому положен-

ня точки  $b$  варіювалось і вибиралось рівним 0.02 м (лінія I), 0.005 м (II) і 0.001 м (III).



**Рисунок 4.** Зміна розкриття тріщин  $\langle u_3(x_1, 0) \rangle$  при  $a = 0$  і  $b = 0.02$  м,  $c = -0.02$  м,  $d = 0.03$  м,  $\sigma_{33}^\infty = 10^6$  Па,  $\sigma_{13}^\infty = 0$  для різних значень заряду на тріщині



**Рисунок 5.** Зміна розкриття тріщин  $\langle u_3(x_1, 0) \rangle$  для різних відстаней між тріщинами

**Обговорення результатів.** З результатів, зображених на рисунках 2, 3, випливає, що величини напружень різко зростають при підході до вершин тріщини. Така поведінка добре узгоджується із формулами (22), з яких очевидно, що напруження мають кореневу особливість у вершинах тріщин. Причому у цьому випадку ця особливість є ще й осцилюючою. Але осциляція проявляється тільки в дуже малих околах тріщин і не впливає на зростання напружень при підходах до їх вершин. Крім того, видно, що електричний заряд на тріщині має вплив на напруження в околі тріщини. Однак цей вплив проявляється при досить великих значеннях електричного заряду, причому найбільш суттєвий вплив має міс-

це в околі тих тріщин, на яких відбувається зміна заряду.

З рисунка 4 видно, що вплив сумарного електричного заряду на тріщині на її розкриття є більш суттєвим, ніж цей вплив на напруження. Зокрема, збільшення величини електричного заряду приводить до збільшення розкриття тріщин. При цьому видно, що значна відмінність у розкриттях проявляється для тих тріщин, на яких має місце збільшення або зменшення сумарного заряду (див. криві II і III).

Рисунок 5 ілюструє зміну розкриття тріщин при зміні відстані між ними. Видно, що для досить віддалених тріщин (криві I) розкриття є найменшим. Це розкриття збільшується при зближенні тріщин (криві II і III). До того ж, при дуже малій відстані між тріщинами розкриття перестають бути симетричними відносно своїх середніх точок, а незначно зближуються у їх верхніх частинах (крива III).

**Висновки.** Розглянуто дві електропровідні тріщини на межі поділу п'єзоелектричних матеріалів, тобто вважається, що їх береги покриті дуже тонким електродним шаром, який не впливає на механічні характеристики. Тріщини можуть мати довільні довжини і можуть бути довільним чином розташованими на інтерфейсі. Така задача є **новою** і раніше не розглядалась. Її аналітичний розв'язок вдалось побудувати завдяки використанню представлень (5), (6) електромеханічних факторів через кусково-аналітичну вектор-функцію та зведенню проблеми до задачі лінійного спряження. Одержано точний розв'язок цієї задачі у вигляді досить простих аналітичних формул. При цьому вперше враховано електричний заряд на тріщинах, що має суттєве практичне значення. Крім того, **практичне значення** одержаних аналітичних результатів полягає в можливості їх використання як еталонних при проведенні експериментальних досліджень чи розробці та апробації чисельних методів для тіл кінцевих розмірів за проблематикою цієї роботи.

Отримано формули для розкриття тріщин, а також для напружень поза тріщинами. Проведено чисельну ілюстрацію отриманих розв'язків. Зокрема, показано залежність розкриття тріщин від величини електричного заряду на тріщині. Встановлено, що найбільш суттєвий вплив електричного заряду на напруження та розкриття проявляється в околі тих тріщин, на яких відбувається зміна заряду.

Проведене дослідження та розроблена аналітична методика відкривають **перспективи подальших досліджень** систем міжфазних тріщин з різними електричними умовами на їх берегах, зокрема міжфазних тріщин з урахуванням електричної проникності їх заповнювача.

### Список використаних джерел

- [1] А. Є. Шевельова, "Про моделювання привершинних зон тріщини між двома анізотропними матеріалами при дії зосереджених сил", *Вісник Дніпропетровського університету, Серія: Механіка*, т. 22, № 5, вип. 18 (2), с. 196-206, 2014.
- [2] О. Onopriienko, V. Loboda, A. Sheveleva, and Y. Lapusta, "Interaction of a conductive crack and of an electrode at a piezoelectric bimaterial interface", *Comptes Rendus Mecanique*, vol. 346, pp. 449-459, 2018.
- [3] P. R. Verma, and R. R. Verma, "Poling angle effect on two mode-III semi-permeable collinear cracks in a piezoelectric strip: Strip-saturation model", *Appl. Math. Modelling*, vol. 88, pp. 573-588, 2020.
- [4] V. Govorukha, M. Kamlah, and S. Zhao, "An interface crack in piezoelectric bimaterial with one electrically conductive and two electrically permeable zones at its faces", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 17 (5), pp. 455-468, 2022.
- [5] T. Cao, X. Feng, and T. Qin, "Analysis for multiple cracks in 2d piezoelectric bimaterial using the singular integral equation method", *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 35, pp. 261-272, 2022.
- [6] A. H. Fartash, M. Ayatollahi, and R. Bagheri, "Transient response of dissimilar piezoelectric layers with multiple interacting interface cracks", *Appl. Math. Modelling*, vol. 66, pp. 508-526, 2019.
- [7] P. Pei, G. Yang, Y. Shi, and C.-F. Gao, "Periodic interfacial cracks in dissimilar piezoelectric materials under the influence of Maxwell stress", *Meccanica*, vol. 55, pp. 113-124, 2020.
- [8] A. Tafreshi, "Analytical stress intensity factors and Jk-integrals of periodic and collinear interface cracks between dissimilar orthotropic materials", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 44, pp. 317-332, 2021.
- [9] V. Govorukha, and M. Kamlah, "Analysis of a mode III interface crack in a piezoelectric bimaterial based on the dielectric breakdown model", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 90 (5), pp. 1201-1213, 2020.
- [10] H. Y. Dang, S. Y. Lv, C. Y. Fan, C. Lu, J. L. Ren, and M. H. Zhao, "Analysis of anti-plane interface cracks in one-dimensional hexagonal quasicrystal coating", *Appl. Math. Modelling*, vol. 81, pp. 641-652, 2020.
- [11] K. Q. Hu, C.-F. Gao, Z. Zhong, and Z. T. Chen, "Interaction of collinear interface cracks between dissimilar one-dimensional hexagonal piezoelectric quasicrystals", *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 101, p. e202000360, 2021.
- [12] K. Q. Hu, H. Jin, Z. Yang, and X. Chen, "Interface crack between dissimilar one-dimensional hexagonal quasicrystals with piezoelectric effect", *Acta Mech.*, vol. 230, pp. 2455-2474, 2019.
- [13] V. Loboda, A. Sheveleva, O. Komarov, and Y. Lapusta, "An interface crack with mixed electrical conditions at its faces in 1D quasicrystal with piezoelectric effect", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, iss. 23, pp. 3334-3344, 2022.
- [14] K. Q. Hu, S. A. Meguid, Z. Zhong, and C.-F. Gao, "Partially debonded circular inclusion in one-dimensional quasicrystal material with piezoelectric effect", *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 16, pp. 749-766, 2020.
- [15] М. В. Костенко, В. Б. Сіліч-Балгабаєва, А. Є. Шевельова, та В. В. Лобода, "Плоска деформація п'єзоелектричного біматеріалу з двома електропроникними тріщинами на межі поділу різних компонент", *Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій*, вип. 34, т. 1, с. 59-70, 2022.
- [16] В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, и Н. А. Шульга, *Механика связанных полей в элементах конструкций: в 5 т., т. 5, Электроупругость*, Гузь А. Н., Ред. Киев, Украина: Наукова думка, 1989.
- [17] V. Loboda, A. Sheveleva, and Y. Lapusta, "An electrically conducting interface crack with a contact zone in a piezoelectric biomaterial", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 51, pp. 63-73, 2014.
- [18] Н. И. Мусхелишвили, *Некоторые основные задачи математической теории упругости*, Москва: Наука, 1966.

## References

- [1] A. E. Sheveleva, "On the modeling of the near crack tip zones between two anisotropic materials under the action of concentrated forces", *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu, Seriya: Mekhanika*, vol. 22, no. 5, iss. 18 (2), pp. 196-206, 2014 [in Ukrainian].
- [2] O. Onopriienko, V. Loboda, A. Sheveleva, and Y. Lapusta, "Interaction of a conductive crack and of an electrode at a piezoelectric bimaterial interface", *Comptes Rendus Mecanique*, vol. 346, pp. 449-459, 2018.
- [3] P. R. Verma, and R. R. Verma, "Poling angle effect on two mode-III semi-permeable collinear cracks in a piezoelectric strip: Strip-saturation model", *Appl. Math. Modelling*, vol. 88, pp. 573-588, 2020.
- [4] V. Govorukha, M. Kamlah, and S. Zhao, "An interface crack in piezoelectric bimaterial with one electrically conductive and two electrically permeable zones at its faces", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 17 (5), pp. 455-468, 2022.
- [5] T. Cao, X. Feng, and T. Qin, "Analysis for multiple cracks in 2d piezoelectric bimaterial using the singular integral equation method", *Acta Mechanica Solida Sinica*, vol. 35, pp. 261-272, 2022.
- [6] A. H. Fartash, M. Ayatollahi, and R. Bagheri, "Transient response of dissimilar piezoelectric layers with multiple interacting interface cracks", *Appl. Math. Modelling*, vol. 66, pp. 508-526, 2019.
- [7] P. Pei, G. Yang, Y. Shi, and C.-F. Gao, "Periodic interfacial cracks in dissimilar piezoelectric materials under the influence of Maxwell stress", *Meccanica*, vol. 55, pp. 113-124, 2020.
- [8] A. Tafreshi, "Analytical stress intensity factors and Jk-integrals of periodic and collinear interface cracks between dissimilar orthotropic materials", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 44, pp. 317-332, 2021.
- [9] V. Govorukha, and M. Kamlah, "Analysis of a mode III interface crack in a piezoelectric bimaterial based on the dielectric breakdown model", *Archive of Applied Mechanics*, vol. 90 (5), pp. 1201-1213, 2020.
- [10] H. Y. Dang, S. Y. Lv, C. Y. Fan, C. Lu, J. L. Ren, and M. H. Zhao, "Analysis of anti-plane interface cracks in one-dimensional hexagonal quasicrystal coating", *Appl. Math. Modelling*, vol. 81, pp. 641-652, 2020.
- [11] K. Q. Hu, C.-F. Gao, Z. Zhong, and Z. T. Chen, "Interaction of collinear interface cracks between dissimilar one-dimensional hexagonal piezoelectric quasicrystals", *Z. Angew. Math. Mech.*, vol. 101, p. e202000360, 2021.
- [12] K. Q. Hu, H. Jin, Z. Yang, and X. Chen, "Interface crack between dissimilar one-dimensional hexagonal quasicrystals with piezoelectric effect", *Acta Mech.*, vol. 230, pp. 2455-2474, 2019.
- [13] V. Loboda, A. Sheveleva, O. Komarov, and Y. Lapusta, "An interface crack with mixed electrical conditions at its faces in 1D quasicrystal with piezoelectric effect", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 29, iss. 23, pp. 3334-3344, 2022.
- [14] K. Q. Hu, S. A. Meguid, Z. Zhong, and C.-F. Gao, "Partially debonded circular inclusion in one-dimensional quasicrystal material with piezoelectric effect", *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 16, pp. 749-766, 2020.
- [15] M. V. Kostenko, V. B. Silich-Balhabaieva, A. E. Sheveleva, and V. V. Loboda, "Plane deformation of piezoelectric bimaterial with two electrically permeable cracks on the interface of different components", *Problemy obchysluvalnoi mekhaniky ta mitsnosti konstruktivii*, iss. 34, vol. 1, pp. 59-70, 2022.
- [16] V. T. Grinchenko, A. F. Ulitko, and N. A. Shulga, *Mechanics of coupled fields in structural elements: in 5 vol.*, vol. 5, Electroelasticity, Guz A. N., Ed. Kiev, Ukraine: Naukova dumka, 1989 [in Russian].
- [17] V. Loboda, A. Sheveleva, and Y. Lapusta, "An electrically conducting interface crack with a contact zone in a piezoelectric bi-material", *Int. J. Solids Struct.*, vol. 51, pp. 63-73, 2014.
- [18] N. I. Muskhelishvili, *Some basic problems of the mathematical theory of elasticity*. Moscow, Russia: Nauka, 1966 [in Russian].

**M. V. Kostenko**, *Postgraduate Student*,  
**A. E. Sheveleva**, *Dr. Phys.-Math. Sc., Professor*,  
 e-mail: shevelevaee@dnu.dp.ua  
**I. Yu. Gergel**, *Ph. D., Associate Professor*,  
**V. V. Loboda**, *Dr. Phys.-Math. Sc., Professor*  
 Oles Honchar Dnipro National University  
 Gagarina ave., 72, Dnipro, 49010, Ukraine

## PLANE DEFORMATION OF A PIEZOELECTRIC BIMATERIAL WITH TWO ELECTRICALLY CONDUCTIVE AND CHARGED INTERFACE CRACKS

*The paper considers a piezoelectric composite formed from two heterogeneous piezoelectric half-planes, on the border of which electrically conductive cracks are arbitrarily located. Consideration of such a problem is approved by the fact that modern actuators and other electronic devices are often created using thin-film electrodes located between piezoelectric layers. Such electrodes are usually made of metal powder, conductive polymers, etc. They do not change the mechanical properties of matrices. Peeling of such electrodes can lead to the appearance of electrically conductive interfacial cracks. So, if the actuator has two electrodes at the interface of piezoelectric materials and they both delaminate, then the problem of the interaction of two electrically conductive cracks arises, which is considered in this paper. The presence of an electric charge on one or both cracks is also allowed. Such a situation can occur if the electroded crack surfaces are connected to electrical sources. Representations of electrical and mechanical factors through piecewise analytical functions have been used for the solution. With their use, the problem is reduced to the problem of linear conjugation. An exact analytical solution of this problem is presented, which indicates the presence of oscillating root singularities near the crack tips. The expressions for mechanical and electrical components on the crack faces and on the parts of the interface outside the cracks are derived. In particular, quite simple analytical formulas for the stresses at the interface of materials between cracks and outside of them have been obtained. Formulas for the displacement jumps along the crack region (crack opening) have been also found. The last formulas clearly show the oscillating nature of the specified factors when approaching the crack tips. A numerical illustration of the obtained solutions is carried out. In particular, graphs of stress and crack opening dependences along the crack lengths and on their total charge have been constructed. It is shown that the effect of the total electric charge on the crack along its opening is more significant than this effect on stresses.*

**Keywords:** *electrode, crack between two materials, analytical solution, piezoelectric composite.*