

ISSN 2519-8106

Міністерство  
освіти і науки України

Дніпровський державний  
технічний університет

---

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

---

Науковий журнал

Заснований в січні 1994 р.

Видається 2 рази на рік

**2 (41) 2019**

Кам'янське  
ДДТУ  
2019

УДК 519+004+504+536+620+621+622+658+669+681+685+33

**Математичне моделювання**

**№ 2 (41) 2019**

**Науковий журнал**

Засновник і видавець Дніпровський  
державний технічний університет

Свідоцтво про державну реєстрацію  
серія **КВ № 22789-12689 ПР**  
від 14.06.2017

**Mathematical Modeling**

**№ 2 (41) 2019**

**Scientific Journal**

Founder and publisher Dniprovsk  
State Technical University

Registration certificate  
**КВ № 22789-12689 ПР**  
dated 14.06.2017

Журнал «Математичне моделювання» публікує статті, що містять нові наукові результати в галузі розробки та застосування методів математичного моделювання, математичних моделей та алгоритмів у природничих науках, техніці, економіці, соціології, навчальному процесі та ін.

Журнал входить до переліку наукових фахових видань України (категорія Б), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук, затвердженого наказом МОН України № 775 від 16.07.2018 р.

Статті індексуються системою Google Scholar (Google Академія)

З 2018 року внесено до реферативної бази даних наукових публікацій Index Copernicus

Друкується за рішенням Вченої Ради Дніпровського державного технічного університету, протокол № 10, від 28.11.2019 р.

*Математичне моделювання. Науковий журнал. Кам'янське, ДДТУ, 2019. № 2(41). 194 с.*

---

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

---

**Середа Борис Петрович** – головний редактор, директор науково-дослідного центру «Матеріалознавства та інноваційних технологій» ДДТУ, зав. каф. автомобілів та автомобільного господарства ДДТУ, д.т.н., професор;

**Бейгул Олег Олексійович** – заступник головного редактора, зав. каф. машинобудування ДДТУ, д.т.н., професор;

**Бабаченко Олександр Іванович** – директор інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н., старший науковий співробітник;

**Баглюк Геннадій Анатолійович** – заступник директора інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, д.т.н., старший науковий співробітник;

**Бельмас Іван Васильович** – зав. каф. технології машинобудування ДДТУ, д.т.н., професор;

**Букетов Андрій Вікторович** – зав. каф. транспортних технологій, Херсонська державна морська академія, д.т.н., професор;

**Гуляєв Віталій Михайлович** – перший проректор, професор каф. промислової біотехнології та загальної хімії ДДТУ, д.т.н., професор;

**Дейнеко Леонід Миколайович** – зав. каф. термічної обробки металів, Національна металургійна академія України (НМетАУ), д.т.н., професор;

**Kolomeisky Anatoly** – Professor of Chemistry and Professor of Chemical and Biomolecular Engineering Rice University, Houston, Texas, USA;

**Крікент Ігор Валентинович** – професор каф. технології та устаткування зварювання ДДТУ, д.т.н., доцент;

**Лисенко Олександр Борисович** – зав. каф. фізики конденсованого стану ДДТУ, д.ф.-м.н., професор;

**Лобода Петро Іванович** – зав. каф. високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», член-кореспондент НАН України, д.т.н., професор;

**Ляшук Олег Леонтійович** – зав. каф. автомобілів, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, д.т.н., доцент;

**Максименко Олег Павлович** – зав. каф. обробки металів тиском ДДТУ, д.т.н., професор;

**Мельник Віктор Іванович** – проректор з наукової роботи, Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, д.т.н., ст. науковий співробітник;

**Міщенко Валерій Григорович** – зав. каф. прикладної фізики та наноматеріалів, Запорізький національний університет, д.т.н., професор;

- Павленко Віталій Миколайович** – проректор з н.-пед. роботи, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», д.т.н., професор;
- Перемітько Валерій Вікторович** – декан металургійного факультета, професор каф. технології та устаткування зварювання ДДТУ, д.т.н., доцент;
- Савчук Петро Петрович** – ректор Луцького національного технічного університету, д.т.н., професор;
- Садовой Олександр Валентинович** – професор каф. електротехніки та електромеханіки ДДТУ, д.т.н., професор;
- Санін Анатолій Федорович** – зав. каф. технології виробництва, Дніпровський національний університет ім. Олеса Гончара, д.т.н., професор;
- Сізарьов Євген Миколайович** – зав. каф. металургії чорних металів ДДТУ, д.т.н., професор;
- Стеблянко Павло Олексійович** – професор каф. вищої математики ДДТУ, д.ф.-м.н., професор;
- С'янов Олександр Михайлович** – декан факультету електроніки та комп'ютерної техніки, професор каф. апаратури радіозв'язку, радіомовлення і телебачення ДДТУ, д.т.н., професор;
- Тищенко Сергій Сергійович** – професор каф. вищої математики, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, д.т.н., професор;
- Tyukin Ivan** – PhD, Dr. Sc., RCUK Academic Fellow, Department of Mathematics, Group of Applied Mathematics, University of Leicester, UK;
- Шумейко Олександр Олексійович** – зав. каф. програмного забезпечення систем ДДТУ, д.т.н., професор;
- Khina Boris** – PhD (Mater. Sci.), DSc (Thermal Phys.) Chief Research Scientist Physico-Technical Institute, National Academy of Sciences of Belarus;
- Yakobson Boris** – Karl F. Hasselmann Chair of Engineering, Professor of Materials Science and NanoEngineering and Professor of Chemistry Rice University Houston, Texas, USA

# ЗМІСТ

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ПРИРОДНИЧИХ НАУКАХ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<b>Dolhikh A.O., Baibuz O.G.</b> The software development for time series forecasting with using adaptive methods and analysis of their efficiency.....	7
<b>Долгіх А.О. Байбуз О.Г.</b> Розробка програмного забезпечення прогнозування часових рядів з використанням адаптивних методів та аналіз їх ефективності.....	15
<b>Tishchenko S.S., Bogdanov D.Y.</b> Geometrical modeling of a sleeve galaxy form by methods of descriptive geometry.....	17
<b>Тищенко С.С., Богданов Д.Ю.</b> Геометричне моделювання форми рукавів галактик методами нарисної геометрії.....	23
<b>Korotka L.I., Rott O.S.</b> Information support of modeling for nonlinear dynamic systems by competition of species.....	24
<b>Коротка Л.І., Ротт О.С.</b> Інформаційна підтримка моделювання нелінійних динамічних систем конкуренції видів.....	31
<b>Zhulkovska I.I., Zhulkovskyi O.A., Suhaj E.A.</b> Estimation of computing algorithms quickly development by using high-precision arithmetic software.....	33
<b>Жульковская І.І., Жульковский О.О., Сугаль Є.О.</b> Оцінки швидкодії обчислювальних алгоритмів при використанні програмних засобів високоточної арифметики.....	38
<b>Tishchenko S.S.</b> Modeling of expanding surfaces, which incident by two direct drive curvess.....	40
<b>Тищенко С.С.</b> Моделювання розгортних поверхонь, інцидентних двом напрямним кривим.....	45
<b>Karpov I.A., Antonenko S.V.</b> Usage of multi-agent system to solvetext processing problem.....	47
<b>Карпов І.А., Антоненко С.В.</b> Використання мультиагентної системи для вирішення задачі обробки тексту.....	52

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<b>Romaniuk A.D.</b> Development of rotary units mechanical transmission mathematical model.....	53
<b>Романюк О.Д.</b> Розробка математичної моделі обертальних вузлів механічної передачі.....	60
<b>Beygul O.O., Grischenko D.I., Beygul V.O., Sereda D.B.</b> Investigation of band loop frame articulated container truck stability by motion on thechnological roads.....	62
<b>Бейгул О.О., Грищенко Д.І., Бейгул В.О., Серета Д.Б.</b> Дослідження поперечної стійкості бугельних несучих систем зчленованих контейнеровозів при русі по технологічних дорогах.....	69
<b>Golovko Y.M., Klymenko D.V., Sdvyzhkova O.O.</b> Probability model for the error estimation at seismic-acoustic forecast while coal mining.....	71
<b>Головко Ю.М., Клименко Д.В., Сдвижкова О.О.</b> Ймовірнісна модель оцінки помилок сейсмоакустичного прогнозу при видобутку вугілля.....	76
<b>Dedoborez A., Kletskov A.</b> Analysis of fastening metals structure by cluster model on the basis of renegodyfraction studies diagnosis.....	78
<b>Дідоборець О.Й., Клєцков О.М.</b> Аналіз структури розплавів простих металів у рамках кластерної моделі на основі даних рентгенодифракційних досліджень.....	81
<b>Maksymenko O.P., Samokhval V.M., Orobtssev A.Y., Marchenko K.K.</b> Modeling the influence of roll wear on the rolling parameters in a wire rod block.....	83
<b>Максименко О.П., Самохвал В.М., Оробцев А.Ю., Марченко К.К.</b> Моделювання впливу зносу валків на параметри прокатування в дровотомому блоці.....	90
<b>Sereda B.P., Belokon K.V., Belokon Y.A., Kruglyak D.O., Sereda D.B.</b> Model of the mechanism reaction for hydrocarbons on intermetallic catalysts.....	92
<b>Серета Б.П., Белоконь К.В., Белоконь Ю.О., Кругляк Д.О., Серета Д.Б.</b> Модель механізмної реакції гідрокарбонів на межметалічних каталістах.....	98

<b>Beztsinnyi A.I., Volosova N.M., Yatsuk A.L.</b> Modelling of loading distribution to rollers supports of rotating drum.....	<b>100</b>
<b>Безцінний А.І., Волосова Н.М., Яцук А.Л.</b> Моделювання розподілу навантажень на роликкоопори обертаючих барабанів .....	<b>107</b>
<b>Shmatko D.Z., Averyanov V.S., Sasov A.A., Cherneta O.G.</b> Mathematical modeling of roller wear ...	<b>109</b>
<b>Шматко Д.З., Авер'янов В.С., Сасов О.О., Чернета О.Г.</b> Математичне моделювання зношування підшипників кочення .....	<b>116</b>
<b>Sereda B.P., Mukovska D.Y.</b> Analysis of metallurgical enterprise functioning career.....	<b>118</b>
<b>Серета Б.П., Муковська Д.Я.</b> Аналіз функціонування кар'єра металургійного підприємства.....	<b>122</b>
<b>Kruglyak I.V.</b> Modeling obtaining of diffusion layers by using a composite powder materials.....	<b>124</b>
<b>Кругляк І.В.</b> Моделювання отримання дифузійних шарів з використанням композиційних порошкових матеріалів .....	<b>128</b>
<b>Karimov H.I., Zvonarova K.A.</b> Modeling of the food industry dependence from raw material base .....	<b>130</b>
<b>Карімов Г.І., Звонарьова К.А.</b> Моделювання залежності харчової промисловості від сировинної бази.....	<b>136</b>
<b>Sheremet O.I., Klimchenkova N.V., Sadovoi O.V., Sokhina Yu.V.</b> Development of the mathematical model for calculation of unstable temperature-mechanical stresses in the traction motor .....	<b>138</b>
<b>Шеремет О.І., Клімченкова Н.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В.</b> Розробка математичної моделі розрахунку несталих температурно-механічних напружень у колекторі тягового електродвигуна ...	<b>148</b>
<b>Cherneta O.G., Kubich V.I., Shcherbina M.A., Averyanov V.S., Shmatko D.Z.</b> Research of steel 45 struggling influence on the parameters of adhesion communication with chrome, chrome-nickel steel.....	<b>150</b>
<b>Чернета О.Г., Кубич В.І., Щербіна М.А., Авер'янов В.С., Шматко Д.З.</b> Дослідження на зносостійкість поверхневого шару кулачка розподільного валу двигуна із сталі 45 після зміцнюючої обробки.....	<b>157</b>
<b>Sereda B.P., Maksimenko O.P., Gaidenko A.S., Sereda D.B.</b> Modeling of the gaseous environment to obtain aluminized coatings doped with chromium under non-stationary temperature conditions .....	<b>159</b>
<b>Серета Б.П., Максименко О.П., Гайдаєнко О.С., Серета Д.Б.</b> Моделювання газового середовища для отримання алітованих\покріттів, легованих хромом при нестаціонарних температурних умовах .....	<b>163</b>
<b>Meshchaninov S.K., Voloshin R.V., Krivencov D.S.</b> Mathematical modeling of continuous metal behavior with defects of macrostructure in the rolling process .....	<b>166</b>
<b>Мещанінов С.К., Волошин Р.В., Кривенцов Д.С.</b> Математичне моделювання поведінки безперервнолитого металу с дефектами макроструктури в процесі прокатки.....	<b>171</b>
<b>Верещак В.Г., Баскевич О.С., Пасенко О.О., Серета Б.П.</b> Моделювання розчинності оксидів металів у матриці діоксиду цирконію.....	<b>173</b>
<b>Vereshchak V.H., Baskevych O.S., Pasenko O.O., Sereda B.P.</b> Modelling of metal oxides solubility in the zirconium dioxide matrix.....	<b>183</b>
<b>Shumeyko A.A., Korotkov V.S.</b> Creation model for the CNC machine of technological system pliability pliability for the cnc machine.....	<b>185</b>
<b>Шумейко А.А., Коротков В.С.</b> Побудова моделі податливості технологічної системи верстата з ЧПК.....	<b>191</b>

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В ПРИРОДНИЧИХ НАУКАХ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185017

UDC 519.688

**A.O. Dolhikh**, postgraduate student, [dolgh.nastya@gmail.com](mailto:dolgh.nastya@gmail.com)

**O.G. Baibuz**, doctor of Engineering Science, Prof., [obaybuz@ua.fm](mailto:obaybuz@ua.fm)

Dniprovsky National University named after Oles Honchar, the city of Dnipro

## THE SOFTWARE DEVELOPMENT FOR TIME SERIES FORECASTING WITH USING ADAPTIVE METHODS AND ANALYSIS OF THEIR EFFICIENCY

*Searching algorithm for optimal values of the smoothing coefficients of adaptive models of time series forecasting by the genetic algorithm is described. The results of the proposed approach in forecasting financial indicators are presented. The analysis of the effectiveness results of the developed algorithm with the help of a multi-criterion procedure is carried out, which allows to consider the accuracy of forecasts, the complexity of the model and to conduct analysis of adequacy using Fisher test, the determination coefficient and the mechanism for checking the residues.*

**Keywords:** forecasting; adaptive methods; genetic algorithm; analysis of model quality.

*Описаний алгоритм пошуку оптимальних значень коефіцієнтів згладжування адаптивних моделей прогнозування часових рядів за допомогою генетичного алгоритму. Представлені результати роботи запропонованого підходу у прогнозуванні фінансових показників. Виконаний аналіз результатів ефективності розробленого алгоритму за допомогою багатокритеріальної процедури, яка дозволяє враховувати точність прогнозів, складність моделі та проводити аналіз адекватності з використанням тесту Фішера, коефіцієнту детермінації та механізму перевірки залишків.*

**Ключові слова:** прогнозування; адаптивні методи; генетичний алгоритм; аналіз якості моделі.

### Setting of a problem

The task of forecasting is particularly relevant in various areas of human activity. In the economy — to predict daily fluctuations in stock prices, exchange rates, weekly and monthly sales volumes, annual production volumes, etc. In natural sciences — to predict the amount of rainfall, natural phenomena, pollution of water resources, the assessment of some biological and biochemical indicators.

Forecasting with many known methods requires substantial mathematical calculations and imposes limitations on the size of a series. Other methods are devoid of these shortcomings, but do not make it possible to perform a fairly accurate forecast. In addition, the difficulty in developing reliable forecasting models can be related to the complex nature of the relevant statistics, if they are characterized by a sharp change in the dynamics of the indicator and non-linearity. In such conditions, forecasting models based on the principles of exponential smoothing are promising. They have a number of advantages over other statistical models: easy to build on experimental data; their application does not require high costs of machine time and complex mathematical calculations; they take into account

the "aging" of information. However, in applying this approach, it is important to find the optimal values of smoothing coefficients  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  for a given series. Therefore, the issue of software development for automatic selection of these coefficients and comparison of the obtained results with the results of other statistical forecasting models is relevant.

#### Analysis of recent research and publications

According to the current estimates [1, 2], for today there are about one hundred types of models of time series forecasting. Researchers are constantly improving existing methods of forecasting and developing new ones. In connection with this, in the works [1, 3] it is proposed to classify them into the following groups: model of the subject area, that is, those which use certain laws of physics, biology, etc. for the construction of the forecast, and models of time series, which are universal for various subject areas. In turn, time series models are also divided into two groups: statistical and structural. Statistical models are considered those ones in which the dependence of the future value from the past is given in the form of some equation [1]. These include regression and auto-regression models, exponential smoothing models, and so on. Structural models are those which try to find some regularities in the development of the process within the time series [3], for example, models based on fuzzy logic, decision trees, neural networks, Markov chains, reference vectors, etc.

The current study examines the issue of forecasting financial indicators using statistical models. The most well-known forecasting models from this class are regression models. In such models, a series is presented as a sum or product of three components:

$$\begin{cases} f(t) = T(t) + S(t) + A(t) + \xi_t \\ f(t) = T(t) * S(t) * A(t) * \xi_t \end{cases} \quad (1)$$

where  $T(t)$  is a trend line that shows the global changes in the phenomenon under study,  $S(t)$  is the seasonality that reflects fluctuations relative to the trend due to external influences;  $A(t)$  — cyclicity (auto-oscillations) — more or less regular fluctuations relative to the trend, due to the internal nature of the phenomenon under study;  $\xi_t$  — forecast error. Forecasting of time series in the case of regression models is to identify the forms  $T(t)$ ,  $S(t)$  and  $A(t)$ . The essential disadvantage of these models is the need for complex mathematical calculations [4]. In addition, to construct correct models, it is important to have a large database of observations and to correctly select the shape of the regression line [4].

Today methods which represent further development of the method of regression analysis, in particular GMDH — group method of data handling are gaining popularity. In the prediction of time series using GMDH, the process is usually presented in the form of 2:

$$y = a + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_i x_j, \quad (2)$$

where  $m$  is the number of variables,  $a, b_i, c_{ij}$  are coefficients of variables in polynomials, also called weights,  $y$  is the value of the series for which forecasting is being built,  $x_i$  and  $x_j$  are the previous values of the time series [5]. During the training, optimum parameters are found. In [5,6] the construction of neural networks of the GMDH type is considered. The weights of the neurons of the constructed network are used as coefficients models. Neural networks of the GMDH type are implemented in the GMDH library of a well-known statistical data processing package R [5]. The main problem while using this approach is, this method like all regression models, requires a rather large representative sample and complex mathematical calculations for a qualitative result [7].

Auto-regressive methods make it possible to get rid of the need to have a fairly large learning sequence and to choose the optimal representation of regression forms. Today there is a hierarchy of methods of auto-regression-running mean, which can be logically defined as follows [8]:

$$AR(p) + MA(q) \rightarrow ARMA(p, q) \rightarrow ARIMA(p, q, d), \quad (3)$$

where the  $AR(p)$  is the autoregressive model of the order  $p$ ,  $MA(q)$  is the model of the moving average-range order  $q$ ,  $ARMA(p, q)$  is the autoregressive model — of moving average with the order of the auto-regression  $p$  and the order of the moving average  $q$ ,  $ARIMA(p, q, d)$  — integrated model  $ARMA(p, q)$  with integration order  $d$ . Models  $ARIMA(p, q, d)$  are the most well-known models in the auto-regressive class. When used in forecasting, a time series is presented in the form of 4:



$$\Delta^d X_t = c + \varepsilon_t + \sum_{i=1}^p \alpha_i \Delta^d X_{t-i} + \sum_{j=0}^q b_j \varepsilon_{t-j}, \quad (4)$$

where  $c$ ,  $\bar{\alpha}_i$ ,  $b_j$  are parameters of the model,  $\Delta^d$  — operator of the time series difference order  $d$ ,  $p$  — autoregressive order,  $q$  — the order of the moving average,  $\varepsilon_t$  — independent, normally distributed errors with zero average. Models *ARIMA* ( $p, q, d$ ) make it possible to switch from non-stationary to stationary process. The advantages of *ARIMA* forecasting models are transparency of modeling; uniformity of analysis and design and variety of applications. The disadvantages are labor inputs and resource intensity of identifying the most appropriate model and the impossibility of modeling nonlinear dependencies. In [9], an algorithm for identifying the optimal form of the *ARIMA* model is proposed by sorting the values of the order of auto-regression, moving average and integration.

In contrast to the above listed statistical methods of forecasting, adaptive models neither impose constraints on the size of a series, nor require the execution of complex mathematical operations, enable the modeling of not only linear dependencies. In addition, such models are based on the principles of exponential smoothing, that is they take into account the "aging" of information. In this approach, a series is presented as a function:

$$u_t = f(a_{1t}, a_{2t}, \dots, a_{pt}, t) + e_t, \quad (5)$$

where  $t$  — time indicator;  $a_{1t}, a_{2t}, \dots, a_{pt}$  — coefficients of the adaptive model at the moment of time  $t$  [10]. Eight types of adaptive forecasting are distinguished, depending on the form of the trend and the presence or absence of a periodic component. In this approach, the question of finding the optimal values of the smoothing parameters  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  is used to calculate the coefficients  $a_{1t}, a_{2t}, \dots, a_{pt}$ . When the values of  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  change, the forecasting error value can increase significantly. In conditions of uncertainty, some authors suggest to accept  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0.3$  [4]. But in such an approach one cannot achieve the required quality of forecasting. Therefore, it is promising to identify the optimum values of the smoothing parameters. In the current study, an algorithm for solving this problem is proposed.

In addition, it is also important to analyze the effectiveness of the adaptive approach and other method-representatives of the statistical class, which are more time-consuming. To do this, the authors developed a multi-criteria procedure that allows considering the accuracy of forecasts, the complexity of the model and its adequacy and compliance with the process under study.

### Objectives setting

The purpose of the research is to develop software for identifying the optimal values of the smoothing coefficients of adaptive methods for forecasting time series. For a thorough analysis of the importance of the results obtained, it is worth comparing the results of the proposed algorithm with the results of other statistical models. To achieve the goal, the following tasks were set:

1. To develop an algorithm for finding optimal values of parameters  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ .
2. To apply the proposed development to forecast financial indicators.
3. To compare the results of forecasting, obtained by the adaptive methods without using searching algorithm for finding optimal values, proposed by the authors and with its usage.
4. To develop a multi-criteria procedure for estimating the effectiveness of forecasting models, which allow taking into account the accuracy of forecasts, the complexity of the model and its adequacy and compliance with the investigated process. Compare the results of the implemented algorithm with the results of the work of other regression methods of forecasting by means of the developed procedure.

### Presentation of the baseline

In adaptive models, a time series is presented as a function 5, during the time of which the value of the deviations of predictive values from the values of the initial series is monitored [10]. They are divided into two groups: linear and seasonal. In models of linear growth, the forecast is calculated by the formula:

$$u_{t+\tau} = a_{1t} + a_{2t}\tau, \quad (6)$$

where  $a$  — the number of steps of the forecast;  $a_{1t}, a_{2t}$  — the coefficients of the adaptive model at a moment of time  $t$ . The adaptive models of linear growth include the Holt model, the Tail-Wage model, Brown's model, and the Box-Jenkins model. Seasonal adaptive models, besides the trend, allow taking

into account periodic fluctuations. Linear adaptive, linear multiplicative (Winters), exponential additive and exponential multiplicative are among them. The listed models differ in the means of finding the parameters  $a_{1t}$ ,  $a_{2t}$ . For example, for the Holt model, formulas 7 are used, and for the model Tail-Wage — formulas 8.

$$\begin{cases} a_{1,t} = \beta_1 u_t + (1 - \beta_1)(a_{1,t-1} + a_{2,t-1}) \\ a_{2,t} = \beta_2(a_{1,t} - a_{1,t-1}) + (1 - \beta_2)a_{2,t-1} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_{1,t} = \beta_1 u_{t-1} + (1 - \beta_1) \hat{u}_t \\ a_{2,t} = a_{2,t-1} + \beta_1 \beta_2 e_t \\ e_t = u_t - \hat{u}_t \end{cases} \quad (8)$$

where  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  are the smoothing coefficients that take values from 0 to 1,  $u_t$  — the real value of the series level at  $t$ -th step,  $\hat{u}_t$  — the predictive value at  $t$ -th step,  $e_t$  — the error at the  $t$ -th step.

A characteristic feature of all adaptive models is that at each step new values of  $a_{1t}$ ,  $a_{2t}$  are calculated. In order to obtain qualitative forecasting results, it is necessary to find the values of the parameters  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , which most correspond to the given series. To solve this problem software was implemented that would allow finding the optimal values of  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$  by means of a genetic algorithm.

The potential solution of the optimization problem (parameters  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ) is presented as chromosomes. In classical genetic algorithms, the chromosomes are presented in the form of a binary vector. However, the binary representation of the chromosomes entails certain difficulties in the search of continuous spaces, which are associated with the large dimensionality of the search space [11]. Therefore, a genetic algorithm with encoding based on real numbers (RGA) was used to solve this problem. Below is the algorithm proposed by the authors for forecasting the time series using the genetic algorithm and adaptive methods.

*Forecasting of time series using adaptive methods and genetic algorithm*

**Step 1:** At the first step, the initial population of the chromosomes is generated. Population size,  $K$ , is given by the user. Each chromosome is a set of values  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ .

**Step 2:** For each chromosome in a population, mean square error (MSE) of forecast using the formula is calculated:

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (u_t - \hat{u}_t)^2}{n - m - 1}, \quad (9)$$

where  $n$  — the length of a series,  $m$  — the number of model parameters. To do this, using the parameters  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ , based on the adaptive model selected by the user, a forecasting series is build. Hereupon, one calculates the mean square error of forecast,  $MSE$ . The smaller the  $MSE$  value, the better the model is.

**Step 3:** Select two chromosomes from the population according to the strategy given by the user and perform chromosomes crossing. As a result of this operation, there are two new individuals who inherit the signs of the parents. Both "parents" and both "descendants" are added to the "intermediate" population. Parents' selection and crossing are conducted  $M$  times.  $M$  is set by the user.

**Step 4:** Carry out a mutation. For each chromosome from the population, a random number is generated. If it is less than the mutation level, then chromosome mutation is carried out according to one of the possible strategies: simple mutation or Michalewicz mutation. The strategy can be changed using the program interface. By default, a simple mutation is used.

**Step 5:** At this step, selection or sampling of the chromosomes for the next generation is carried out. For the obtained "intermediate" population, one calculates the  $MSE$  value. A certain amount of chromosomes with the lowest value of the mean square error forecast,  $q$ , enter the next population. In order to prevent early degeneration of the population, random  $K-q$  chromosomes are generated and added to the new population.

Steps 2—5 are performed iteratively until one of the conditions for stopping the genetic algorithm is fulfilled: the number of generations entered by the user is reached or the algorithm will come

up to a single solution. After that the set of values of coefficients ( $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ) is used for prediction of the following values of a series.

Testing of the of the developed results software was carried out in time series, which represent time series of shares of well-known foreign companies such as Apple, Microsoft, IBM, etc., at the close of exchange from December 2017 till December 2018 [12]. Fig. 1 shows the time series of price of Microsoft and its correlogram, which suggests that there is a growing trend in the series and there are no pronounced cyclical fluctuations.

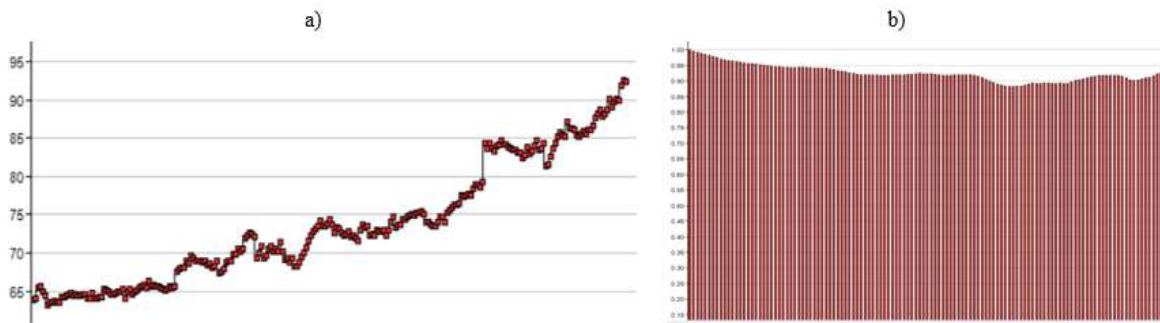


Fig. 1. Series (Microsoft): a) — output value of series, b) — correlogram of series

In conditions of uncertainty, it is recommended to use  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0.3$  as values of coefficients [4]. Tabl. 1 shows the mean square error forecast,  $MSE$  for predicting Microsoft series using values of default coefficient (0.3) and  $MSE$  values if used the approach proposed by the authors. For the adjustment of models, a genetic algorithm with valid coding by the following parameters was used:  $N = 100$  (population size), percentage of the best chromosomes to be left in population,  $q = 80\%$ , number of epochs (repetitions) of the genetic algorithm = 30, mutation level = 0, 1 Table 2 shows how much the  $MSE$  value decreased when using the approach proposed by the authors compared to the recommended default values.

Table 1. Mean square error forecast,  $MSE$

<i>Model</i>	<i>MSE</i>	<i>Model</i>	<i>MSE</i>
Holt model ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	1.0232	Holt model ( $B_1=0.9156, B_2=0.0552$ )	0.581
Tail-Wage model ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	1.0232	Tail-Wage model ( $B_1=0.9142, B_2=0.0564$ )	0.6002
Brown model ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	1.0197	Brown model ( $B_1=0.7112$ )	0.8195
Box-Jenkins model ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	0.8353	Box-Jenkins model ( $B_1=0.8327, B_2=0.0742, B_3=0.0654$ )	0.6185
Linear additive ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	0.7093	Linear additive ( $B_1=0.874, B_2=0.0087, B_3=0.0397$ )	0.6266
Linear multiplicative ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	0.7532	Linear multiplicative ( $B_1=0.00, B_2=0.0071, B_3=0.8814$ )	0.6227
Exponential additive ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	0.7201	Exponential additive ( $B_1=0.0509, B_2=0.0912, B_3=0.8773$ )	0.5854
Exponential multiplicative ( $B_1=B_2=B_3=0.3$ )	0.7204	Exponential multiplicative ( $B_1=0.2005, B_2=0.0147, B_3=0.8543$ )	0.5939

Table 2. Decrease of value of mean square error forecast, *MSE*

<i>Model</i>	<i>Decrease of value of mean square error forecast, %</i>
Holt model	43.22
Tail-Wage model	41.34
Brown model	19.63
Box-Jenkins model	25.98
Linear additive	11.66
Linear multiplicative	17.33
Exponential additive	18.71
Exponential multiplicative	17.56

As shown in tabl. 1 and 2, using the proposed approach, it is possible to achieve a reduction in the mean-square error forecast at least by 11.66%. In the best case (for the Holt model) we managed to improve the quality of the built forecasts by 43.22%.

However, in order to fully assess the significance of the results obtained, it is worth comparing the results of the adaptive models with the results of other models of time series, which are also representatives of the class of regression methods and have proven themselves well in the analysis and forecasting of processes different by nature and complexity. For this purpose, integrated models of autoregression integrated moving average [9] (ARIMA) and group method of data handling (GMDH) [5,6] were used. These models were previously trained in the same time sequences as adaptive methods. The optimal values of the integration order, autoregression, and moving average of ARIMA model were found using procedures [9,13]. The training of the neural network of the GMDH type was conducted using the algorithm [5].

In order to compare the quality of forecasting, a multi-criteria procedure was developed that allows to regard the accuracy of built forecasts, the complexity of the model, and the results of the analysis of the residues. Forecasting accuracy is estimated by calculating the mean square forecast error, *MSE*, and sum squared error, *SSE*. To assess the relationship between the accuracy of the model and its complexity — the significance of the information quality criteria of Akaike, *AIC*, and Schwartz, *BIC*. The smaller the value of *SSE*, *MSE*, *AIC* and *BIC*, the better is the result. The adequacy of the model is verified using Fisher test and the calculation of the value of the adjusted determination coefficient,  $R^{2*}$ . The higher the value of the determination coefficient, the more qualitative is the model. Tabl. 3 shows the results of comparing the forecasting efficiency using adaptive models, ARIMA models, and group argumentation based on *SSE*, *MSE*, *AIC*, *BIC* and  $R^{2*}$ .

Table 3. Results of model quality comparison by quantitative criteria

<i>Model</i>	<i>SSE</i>	<i>MSE</i>	<i>AIC</i>	<i>BIC</i>	$R^{2*}$	<i>Number of parameters</i>
GMDH	146.4159	0.9893	0.2831	1.7495	98.0949	105
Brown model	205.6839	0.8195	-0.1912	-0.1633	97.329	1
Lin. ad.	154.4175	0.6177	-0.47	-0.4281	97.9913	3
Lin. mult.	153.1447	0.6126	-0.4783	-0.4364	98.0078	3
Exp. ad.	146.1417	0.5846	-0.5251	-0.4832	98.0985	3
Exp. mult.	146.1336	0.5845	-0.5252	-0.4833	98.0986	3
Box-Jenkins model	145.3183	0.5813	-0.5307	-0.4886	98.1092	3
Tail-Wage model	145.527	0.5798	-0.5372	-0.5093	98.1064	2
Holt model	145.5264	0.5798	-0.5372	-0.5093	98.1064	2
ARIMA	131.1438	0.5309	-0.6097	-0.5259	98.2928	6

By comparing the effectiveness of the implemented forecasting models shown in table 3, one can conclude that for Microsoft series the best results have been shown by the ARIMA. But among the class of adaptive models, one can also find the model that will give sufficiently high-quality forecastings. For example, if you compare the values of  $MSE$  and  $R^2$  \* obtained by the ARIMA model and the Holt model in the percentage scale, you can easily see that the  $MSE$  value for the Holt model is greater than the  $MSE$  for the ARIMA model by 9.22%, and the value of the determination coefficient for the ARIMA model is higher than  $R^2$  \* for the Holt model only by 0.2%. An important factor here is that the use of the ARIMA model requires the calculation of the values of six parameters, while the use of the Holt model requires the calculation of only two coefficients. It is worth noting that all adaptive models by the values of information quality criteria,  $AIC$  and  $BIC$ , show better results than models of neural networks of type GMDH, which is caused by too many parameters of GMDH.

Fig. 2 shows the time series that represents the stock prices of AAON Inc. in the period from 2017 to 2018 and its correlogram. Looking at them one can draw a conclusion about a distinct seasonal component in a series and a lack of a tendency to increase or decrease. Tabl. 4 presents the results of the evaluation of the effectiveness of statistical models implemented in software, conducted with the help of a multi-criteria procedure.

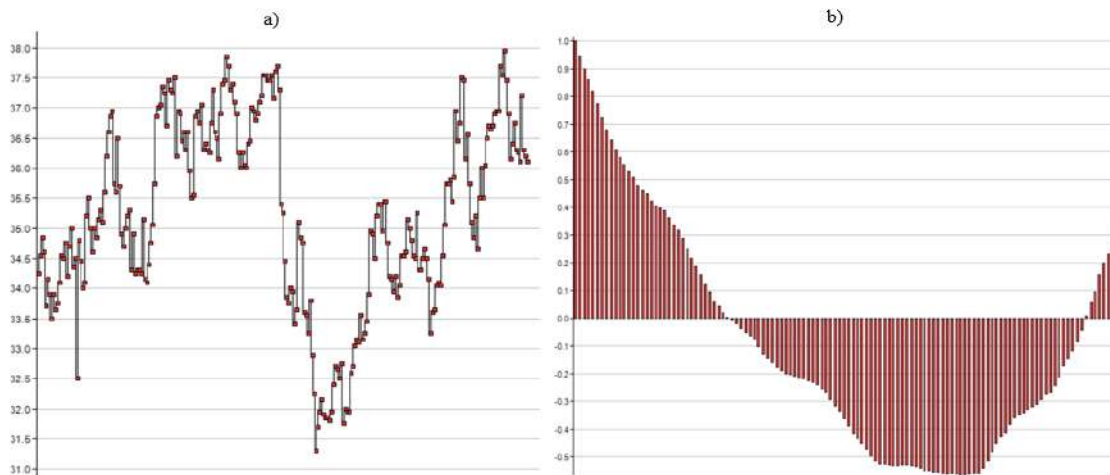


Fig. 2. Series (AAON Inc.): — output value of a series, b) — correlogram of a series

Table 4. Results of model quality comparison by quantitative criteria

<i>Model</i>	<i>SSE</i>	<i>MSE</i>	<i>AIC</i>	<i>BIC</i>	$R^{2*}$	<i>Number of parameters</i>
GMDH	64.4917	0.4425	-0.5214	0.945	80	105
Brown model	100.682	0.4011	-0.9056	-0.8777	70.1742	1
Exp. ad.	72.7227	0.2909	-1.223	-1.1811	77.9284	3
Exp. mult.	72.7128	0.2909	-1.2232	-1.1813	77.9313	3
Box-Jenkins model	72.0692	0.2883	-1.232	-1.1901	78.1146	3
Tail-Wage model	72.0387	0.287	-1.2404	-1.2124	78.1233	2
Holt model	72.0365	0.287	-1.2404	-1.2125	78.1239	2
ARIMA	69.8501	0.282	-1.2475	-1.1777	78.7482	5
Lin. mult.	69.0402	0.2762	-1.275	-1.2331	78.98	3
Lin. ad.	69	0.276	-1.2756	-1.2337	78.9916	3

As one can see from tabl. 4, for the time series with a pronounced periodic component, according to the values of information quality criteria, adaptive models have shown significantly better results than more complicated statistical methods. Only by the value of the  $SSE$  they yield to the mod-

els of group model of data handling. However, the use of GMDH requires the calculation of a much larger number of parameters (105 and 3), while it gives reduction of the error value only by 6.5% as compared to the linear additive model.

### Conclusions and perspectives of further research

1. In the course of the research there was developed the software for identifying the optimum values of smoothing coefficients of adaptive forecasting methods,  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$ . For this purpose, a genetic algorithm with valid coding was used.

2. The proposed approach was used to forecast time series that represent the daily fluctuations of stock prices of known American companies such as IBM, Microsoft, Apple, AAON, etc., from December 2017 till December 2018. Using searching algorithm of optimal values of the smoothing coefficients, it was possible to improve the accuracy of forecasts not less than 10%.

3. The developed software complex allows comparing the results of various time series forecasting models using the multi-criteria procedure, which makes it possible to take into account error of forecasting, *SSE* and *MSE*, information quality criteria, *AIC* and *BIC*, and adjusted determination criterion,  $R^{2*}$ . Performance analysis of adaptive methods was compared with the results of the ARIMA and GMDH models. The analysis of the results showed that in the most series by the sum square error forecast they are inferior to the models of autoregression integrated moving average and group method of data handling. However, if we take into account not only the value of error but also the complexity of mathematical calculations, then adaptive methods in all cases show better results than group method of data handling that uses too many parameters, and in certain ones they exceed ARIMA models, for example in the analysis of sequences with a pronounced seasonality. This also confirms the importance and complexity of the question of selecting the optimal forecasting model for a specific time series [14].

For today, the perspective direction of research in the field of time series analysis is the question of construction of structural models such as neural networks, fuzzy logic, Markov chains, etc. and analysis of their efficiency. Therefore, the purpose of the further research is to expand the developed software complex with forecasting models of this class, as well as to compare the quality of the results of statistical and structural models by means of a multi-criteria procedure. Such an approach will enable to perform the automatic selection of optimal forecasting models for a specific dynamic series. In addition, the best models selected can be used later in the construction of ensembles, that is, sets, models of forecasting, which can significantly improve the forecasting quality [15].

### References

- [1] Chuchuieva, I.A. (2012). Model' prohozuvannya chasovykh ryadiv za vybirkoyu maksymal'noyi pravdopodoby: dysertatsiya na otrymannya stupenyu kandydata tekhnichnykh nauk [A time series forecasting model for a maximum likelihood sample: thesis for a candidate of technical sciences]. *Candidate's thesis*. Moscow: Moscow State Technical University named after Bauman.
- [2] Tikhonov, E.E. (2006). Metody prohozuvannya v umovakh rynku [Forecasting methods in market conditions]. Nevinnomyssk.
- [3] Yang, J.M. (2006). Power System Short-term Load Forecasting. *Candidate's thesis*. Germany, Darmstadt: Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universitat.
- [4] Biloborodko, O.I., T.G. Yemelyanenko. (2014). Analiz dynamichnykh ryadiv [Dynamic Series Analysis]. Dnipro: DNU named after Oles Holnchar [in Ukrainian].
- [5] Osman Dag, Ceylan Yozgatligil. (2016). GMDH: An R Package for Short Term Forecasting via GMDH-Type Neural Network Algorithms. *The R Journal Vol. 8/1, Aug. 2016, ISSN 2073-4859*. Retrieved from <https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-028/RJ-2016-028.pdf>.
- [6] Dolhikh A.O. (2019). Prohozuvannya finansovykh chasovykh ryadiv z vykorystannyam neyronnoyi merezhi typu MHUA [Financial time series forecasting using a neural network of the GMDH type]. Proceedings from *XXIII mizhnarodnoho molodizhnoho forumu «Radioelektronika i molodshchyna u XXI stolitti», konferentsiya «Matematychnye modelyuvannya, systemnyy analiz i teoriya optymal'nykh rishen'» – The Twenty Third International Youth Forum “Radio Electron-*

- ics and Youth in the XXI Century*”, Conference “*Mathematical Modeling, Systems Analysis and Theory of Optimal Solutions*”. (pp. 146–147). Kharkiv [in Ukrainian].
- [7] The group method of data handling (GMDH). Retrieved from <http://www.mgua.irtc.org.ua/ru/index.php?page=gmdh> (application date: 09.05.2019)
- [8] A.V.Tregub, I.V.Tregub. (2011). Metodyka pobudovy modeli ARIMA dlya prohozuvannya dynamiky chasovykh ryadiv. [The method of constructing the ARIMA model for predicting the dynamics of time series]. «*Lisovyy visnyk*», T.5, rozdil «*Matematychnе modelyuvannya*» – “*Forecast Newspaper*”, 5, section “*Mathematical modeling*”. (pp. 179–183).
- [9] Hyndman, R.J., Khandakar, Y. (2008). Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*. July 2008. Vol. 27, Issue 3.
- [10] Lukashin, Yu.P. (2003). Adaptivni metody korotkostrokovoho prohozuvannya chasovykh ryadiv [Adaptive methods of time series short-term forecasting]. M.: Finance and Statistics.
- [11] Herrera F., Lozano M., Verdegay J.L. (1998). Tackling real-coded Genetic algorithms: operators and tools for the behavior analysis. *Artificial Intelligence Review*, Vol. 12, No. 4, (pp. 265–319).
- [12] YAHOO! Finance. Retrieved from <https://finance.yahoo.com/>.
- [13] Kwiatkowski, D., Phillips P.C.B., Schmidt, P., Shin, Y. (1992). Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*, 54. (pp. 159–178).
- [14] Armstrong, J.S., Adya, M., Collopy, F. (2001). Rule-Based Forecasting Using Judgment in Time Series Extrapolations. Principles of Forecasting: A Handbook for Researcher and Practitioners. Kluwer, Dordrecht.
- [15] Wichard, J.D., Ogorzalek, M. (2007). Time series prediction with ensemble models. *Neurocomputing*, 70, Issues 13–15. (pp. 2371–2378).

## РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНИХ МЕТОДІВ ТА АНАЛІЗ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Долгіх А.О. Байбуз О.Г.

### Реферат

Особливої актуальності в різних областях людської діяльності набуває задача прогнозування. В економіці — для прогнозування щоденних коливань цін на акції та курсів валют. В природничих науках — для визначення кількості опадів, оцінки біологічних та біохімічних показників.

Прогнозування за допомогою багатьох відомих методів вимагає суттєвих математичних обчислень та накладає обмеження на розміри ряду. Інші методи позбавлені цих недоліків, але не дозволяють робити достатньо точний прогноз. В таких умовах перспективним є використання адаптивних моделей. Їх легко будувати на експериментальних даних; їх застосування не потребує великих витрат машинного часу та складних математичних обчислень; вони враховують «старіння» інформації. Однак при застосуванні цього підходу важливо віднайти оптимальні значення коефіцієнтів згладжування,  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  для заданого ряду. Актуальним є питання розробки програмного забезпечення для автоматичного підбору цих коефіцієнтів.

Метою дослідження є розробка програмного забезпечення ідентифікації оптимальних значень коефіцієнтів згладжування адаптивних методів прогнозування та оцінка якості отриманих результатів. Для ідентифікації оптимальних значень  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ , була розроблена процедура пошуку, заснована на використанні генетичного алгоритму з дійсним кодуванням. Запропонований підхід був використаний для прогнозування щоденних коливань цін на акції відомих компаній, таких як IBM, Microsoft, Apple, AAON, тощо. Для порівняння ефективності адаптивних методів з результатами роботами інших статистичних підходів була багатокритеріальна процедура. Вона дозволяє враховувати значення похибок прогнозу, інформаційних критеріїв якості, й

скорегованого критерію детермінації. Результати порівняння показали, що, при використанні невеликої кількості параметрів у порівнянні з іншими моделями, адаптивні методи можуть будувати досить якісні прогнози. Отримані результати можуть бути у подальшому використані для ідентифікації оптимальної моделі динамічного процесу та при побудови ансамблів моделей прогнозування.

### Література

1. Чучуєва І. А. Модель прогнозування часових рядів за вибіркою максимальної правдоподоби: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.00 / Московський державний технічний університ. Москва, 2012. 154 с.
2. Тихонов Е. С. Методи прогнозування в умовах ринку: учбовий посібник .Невинномиськ, Північно-Кавказький державний технічний університет, 2006. 221 с.
3. Jingfei Y. M. Power System Short-term Load Forecasting: Candidate dissertation / Technical University Of Electrical and Computer Engineering. Darmstadt, Germany, 2006. 139 p.
4. Білобородько О. І., Ємел'яненко Т. Г. Аналіз динамічних рядів: учбовий посібник. Дніпро: РВВ ДНУ, 2014. 80 с.
5. Dag O., Yozgatligil C. GMDH: An R Package for Short Term Forecasting via GMDH-Type Neural Network Algorithms. *The R Journal*. 2016. Vol. 8. No. 1. P. 379-386.
6. Долгих А. О. Прогнозування фінансових часових рядів з використанням нейронної мережі типу МГУА: *Сучасні методи обробки зображень*: матеріали XXIII міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті». Харків: ХНУРЕ, 2019. Т. 7. С. 146–147.
7. Метод групового урахування аргументів (МГУА). URL: <http://www.mgua.irtc.org.ua/ru/index.php?page=gmdh> (дата звернення: 11.10.2019).
8. Трегуб А. В., Трегуб І. В. Методика побудови моделі ARIMA для прогнозування динаміки часових рядів. *Лісовий вісник*. 2011. № 5. С. 179–183.
9. Hyndman R. J., Khandakar Y. Automatic Time Series Forecasting: The forecast Package for R. *Journal of Statistical Software*. 2008. Vol. 27. No. 3.
10. Лукашин Ю. П. Адаптивні методи короткострокового прогнозування часових рядів: учбовий посібник. Москва: Фінанси і статистика, 2003. 416 с.
11. Herrera F., Lozano M., Verdegay J. Tackling real-coded Genetic algorithms: operators and tools for the behaviour analysis. *Artificial Intelligence Review*. 1998. Vol. 12. No. 4. P. 265–319.
12. YAHOO! Finance. URL: <https://finance.yahoo.com/> (дата звернення: 11.10.2019).
13. Kwiatkowski D., Phillips P.C., Schmidt P., Shin Y. Testing the null hypothesis of stationarity against the alternative of a unit root. *Journal of Econometrics*. 1992. Vol 54. P. 159–178.
14. Armstrong J., Adya M., Collopy F. Rule-Based Forecasting Using Judgment in Time Series Extrapolations. *Principles of Forecasting: A Handbook for Researcher and Practitioners*. 2001. Vol. 1. P. 259-282.
15. Wichard J. D, Ogorzalek M. Time series prediction with ensemble models. *Neurocomputing*. 2007. Vol. 2. P. 2371–2378.



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185026

UDC 524.66: 514.181.2

**S.S. Tishchenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Environmental Mathematics, voloskrs@i.ua

**D.Y. Bogdanov**, student gr. M-1-18 Faculty of Engineering and Technology, dbgdnv@gmail.com  
Dnipropetrovsk State Agrarian and Economic University, Dnipro

## GEOMETRICAL MODELING OF A SLEEVE GALAXY FORM BY METHODS OF DESCRIPTIVE GEOMETRY

*Graphical modeling of the sleeves of galaxies by spirals is considered. It is shown that the sleeves of the galaxies have the form of logarithmic spirals, with the angle between the radius vector and the tangent remains constant for one and the same galaxy, but different for other galaxies.*

**Keywords:** galaxies; logarithmic spiral; sleeves.

*Розглянуто графічне моделювання рукавів галактик спіралями. Показано, що рукави галактик мають форму логарифмічних спіралей, причому кут між радіус-вектором та дотичною залишається сталим для однієї і тієї ж галактики, але різним для інших галактик.*

**Ключові слова:** галактики; логарифмічна спіраль; рукави.

### Formulation of the problem

There are many material objects in our universe, ranging from microscopic particles of matter to large clusters such as galaxies, nebulae, and more. Of these objects, galaxies stand out the most, in that most of them have a distinct helix shape. Each galaxy has two or more arms that diverge from the center. The clear shape of the sleeves allows them to be approximated by smooth geometric curves, in particular helices, which will allow them to understand more the nature of their formation.

### Analysis of recent research and publications

In our time, the shape of the Universe has stabilized and the process of accumulation of matter in and around cells is underway [8]. These cells are galaxies in our universe. Many theories of galaxy formation have been cited in the literature [1, 2], but there is no generally accepted theory [3]. In particular, galaxy arms are formed by the emission of matter from the nucleus, with the motion of matter consisting of rotation around the center and radial motion. These two movements affect the matter and it is formed in the form of sleeves [2]. The formation of the sleeves causes the galaxies to have a disco-shaped shape and all the sleeves are in a plane.

With the development of the science of the universe and the mathematics of the theory of formation of the universe increasingly relied on mathematics, which led to its development, but these works [5, 6] increasingly rely on mathematics that requires deep knowledge.

Spiral curves refer to transcendental curves and have many types [7], and the appearance of a spiral type will allow simple methods to get closer to understanding the nature and formation of galaxies.

### Formulation of the study purpose

The purpose of the research is to approximate the sleeves of galaxies with transcendental curves - spiral rallies - and to identify the spiral type by the methods of descriptive geometry, in particular graphic constructions on a plane.

### Presenting main material

The spiral as a curve line is constructed in the polar coordinate system. For this purpose, a polar axis  $P$  is drawn from the polar center  $O$ , from which a radius vector  $r$  is deposited at a polar angle  $\varphi$ . Thus, each point  $A$  of the helix is defined by two coordinates a polar angle  $\varphi$ , which is determined in radians, and a radius vector  $r$ , which is a function of the polar angle, that is,  $A(\varphi, r)$ . The shape of the spiral depends entirely on the function of the radius vector  $r = r_0(\varphi)$ , but regardless of the type of spiral, the initial radius vector  $r_0$  cannot be zero  $r_0 \neq 0$ , since in this case the existence of the spiral will be impossible.

The method of galaxy research was carried out on the image of a galaxy taken from the Internet, and the image of the galaxy was chosen such that its plane was perpendicular to the line of sight. Then the sleeves were mid-lines. In the nucleus of the galaxy was located the polar center  $O$  from which the polar axis of  $P$  was determined. From the polar center  $O$  at a constant angle  $\Delta\varphi$  several rays (Fig. 1). These rays give points when crossing the midline of the sleeve  $A, B, C, D, \dots$

Points  $A, B, C, D, \dots$  united by chords  $AB, BC, CD, \dots$ . Together with the rays, these chords form triangles  $OAB, OBC, OCD, \dots$ . In these triangles are angles  $\angle AOB, \angle BOC, \angle COB, \dots$  equal to each other and equal to the polar angle  $\Delta\varphi$ , that is  $\angle AOB = \angle BOC = \angle COB = \dots = \Delta\varphi$ . angle  $\angle OAB, \angle CBO, \angle DCO, \dots$ . Their average value was measured and calculated. It was found that for the same galaxy these angles are close in magnitude, their deviation from the mean is  $\pm 3,7^\circ$ . The calculations found that the angles  $\angle OAB = \angle CBO = \angle DCO \dots$  are equal. Since the angles  $\angle AOC = \angle BOC, \angle BOC = \angle COD$ , and the corners  $\angle OAB = \angle OBC, \angle OBC = \angle OCD$  then triangles  $\triangle OAB, \triangle BOC, \triangle OCD$  are similar to each other,  $\triangle OAB \sim \triangle BOC \sim \triangle OCD \dots$ . This means that the differences are the radius vectors  $\Delta A = OB - OA, \Delta B = OC - OB, \Delta C = OD - OC, \dots$  has become, that is  $\Delta A = \Delta B = \Delta C = \dots$ . So the point is  $A$ , that moves along a radius vector, for example,  $OA$  which rotates evenly at a speed proportional to the distance traveled. That is, the polar angle  $\varphi$  is proportional to the logarithm of the distance  $OA, OB, OC, \dots$  that is, logarithms of radius vectors [7]. Thus, the radius vector rotates at a polar angle  $\varphi$  exponentially. This means that as a result, we have a logarithmic spiral.

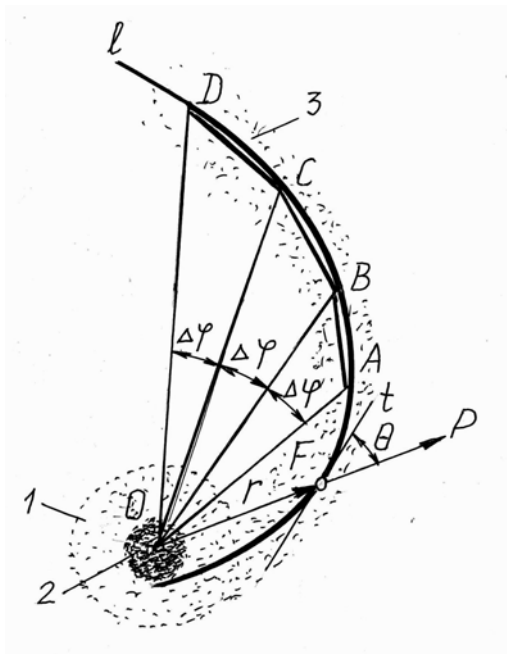


Fig. 1. Scheme of approximation of the galaxy sleeve: 1 — bulge; 2 — core; 3 — sleeve; 1 is the middle line of the sleeve







The logarithmic spiral in the polar coordinate system is described by the following equation

$$r = r_0 \cdot e^{w \cdot \varphi}, \tag{1}$$





where  $r_0$  — initial radius vector;  $w$  — helix shape factor;  $\varphi$  - the polar angle measured in radians. Coefficient  $w$  completely affects the shape of the logarithmic spiral. If  $w = 0$ , then the spiral turns into a circle,  $r = r_0$ , if the coefficient is infinite, then the spiral turns into a straight line. In general, the coefficient  $w$  is equal to the cotangent of the angle  $\theta$  between the tangent  $t$  at an arbitrary midpoint  $F$  and radius vector  $r$ ,  $w = \text{ctg} \theta$ , (Fig. 1). For the same spiral this angle is constant and does not change at any value of the polar angle  $\varphi$  [4, 7].

To determine the angle  $\theta$  mid-lines were smoothed in the galaxy's sleeves, smoothed by curves. The angle was measured at five points and then the mean was calculated. Separate data are given in Table. 1.

Table 1. The average value of the angle between the tangent and the radius vector of some galaxies

# S / n	Image galaxies	Name	Direction twisting sleeves	Angle between tangent and radius vector, deg	Coefficient of spiral shape, $w$
1		MN1	Counter-clockwise movement	75°35'	0,257
2		M51	In clockwise direction	72°28'	0,315
3		NGC 3344	In clockwise direction	73°45'	0,291
4		M 74	In clockwise direction	68°35'	0,392
5		NGC 1365	Counter-clockwise movement	76°15'	0,243
6		NGC1566	Counter-clockwise movement	69°28'	0,374

*Continue of the table 1.*

7		M137	In clockwise direction	73°37'	0,294
8		M101	Counter-clockwise movement	77°20'	0,225
9		NGC1753	Counter-clockwise movement	76°50'	0,245
10		M77	Counter-clockwise movement	67°45'	0,408

The table shows that the smallest value of the helix parameter  $w = 0.225$  is in the M101 galaxy, which corresponds to the angle  $\theta = 77^{\circ}20'$ , and the highest  $w = 0.392$  in the M74 galaxy, which corresponds to the angle  $\theta = 68^{\circ}35'$ . The difference between them is 0.067, or  $3^{\circ}45'$ , which corresponds to 27.3%. Given that the middle lines of the sleeves were constructed graphically, the accuracy can be considered satisfactory.

It should be noted that the number of sleeves ranged from two MN1s, NGC1566 to five NGC1365. The table also shows the direction of spin of the galaxy's sleeves.

The conducted researches have allowed to develop algorithm of construction of logarithmic spirals which has the following points:

1. We define the values of the initial radius vector  $r_0$  and the angle  $\theta$  between tangent to helix and radius vector.

2. Determine the increment of the radius vector  $\Delta r$  by increasing the polar angle to increase  $\Delta\varphi$ . To do this, we draw from the polar center  $O_1$  the initial radius vector  $r_0$  (Fig. 2a). From the polar center  $O_1$  under the increase of the polar angle  $\Delta\varphi$  we draw a beam  $O_1A$ . From the end of the initial radius vector  $r_0$  (point A) at an angle  $\theta$  we draw a tangent t which intersects with a ray  $O_1A$  giving a point B. Drawing an arc from the polar center  $O_1$  of the circle radius  $O_1A$  determine the point on the ray  $A_1$ . The segment  $A_1B$  will be an increment of the radius vector  $A_1B = \Delta r$  when rotated by an angle  $\Delta\varphi$ .

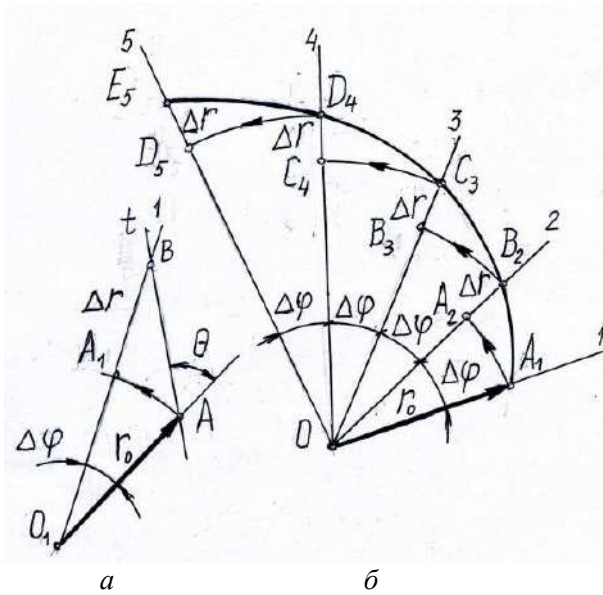


Fig. 2. The scheme to the graphical model of the logarithmic spiral: a — the graphical increment of the radius vector; b — pobudova spirali

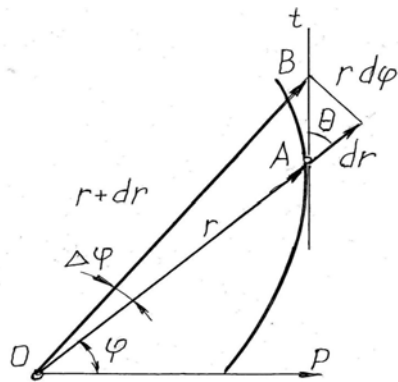


Fig. 3. Scheme for the analytical determination of the angle between radius vector and tangent

3. To construct a spiral from the polar center  $O$  with the interval of the polar angle of  $\Delta\varphi$  right-smoke rays,  $O1, O2, O3, \dots, O5$  (Fig. 2b).

4. On the first ray  $O1$  we postpone the initial radius vector  $r_0$ . From its end (point  $A_1$ ), the arc of the circle transfers this point to the ray  $O2$ , and obtains a point  $A_2$ . From this point we delay the segment  $\Delta r$  and get the point  $B_2$ . The segment  $OB_2$  will be equal to the radius of the vector  $r_2$ .

5. We transfer the point  $B_2$  by the arc of the circle to the ray  $O3$  and obtain the point  $B_3$  from which we defer the radius vector  $\Delta r$  increment and get the point  $C_3$ . The segment  $OC_3$  will be a radius vector  $r_3$ .

6. Build until the rays are over. By connecting the points obtained  $A_1, B_2, C_3, D_4$  and  $E_5$  smooth curve we obtain the required logarithmic spiral.

For analytical verification, we refer to the scheme in Fig. 3. The tangent of the angle  $\theta$  between the radius vector  $r$  and the tangent  $t$  will be equal

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{r d\varphi}{dr} \tag{2}$$

From the expression of the logarithmic helix (1) we find the first derivative

$$\frac{dr}{d\varphi} = r_0 w e^{w\varphi}.$$

Substituting the resulting expression into the formula for determining the tangent of the angle  $\theta$  (2) we obtain

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{r_0 e^{w\varphi}}{r_0 w e^{w\varphi}} = \frac{1}{w}.$$

Where will we get the expression for angle  $\theta$ :

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{w}\right).$$

The angle  $\theta$  values were calculated for all galaxies in Table. 1. The results of the calculations are presented in table. 2.

As can be seen from the table, the calculations obtained the same results as the graphical constructions. This indicates the high accuracy of geometric constructions.

Table 2. Determination of the angle between the radius vector and the tangent

The galaxy number in Table 1	Form factor $w$	$\frac{1}{w}$	$\arctg\left(\frac{1}{w}\right)$	Angle $\theta$ , degr
1	0,257	3,891051	1,31924	75,5869
2	0,315	3,174603	1,265636	72,5156
3	0,291	3,436426	1,287617	73,775
4	0,392	2,55102	1,197205	68,5948
5	0,243	4,115226	1,332417	76,3419
6	0,374	2,673797	1,212903	69,4942
7	0,294	3,401361	1,284853	73,6167
8	0,225	4,444444	1,349482	77,3196
9	0,245	4,081633	1,330529	76,2337
10	0,408	2,45098	1,183412	67,8045

### Conclusions and prospects for further research

Based on the research we can draw the following conclusions.

1. The development of galaxy arms is subject to the most widespread law in nature — exponential, when growth of some magnitude occurs in proportion to the logarithm.
2. The slight deviation of the angle between the radius vector and the tangent for different spirals indicates that the same elements are present at the base of the galaxies.
3. Since the initial radius vector of the spiral can not be zero, galaxies could not be formed "from nothing", they were formed from the original protomatter.
4. A graphical algorithm for modeling galaxies sleeves by logarithmic spirals is proposed, which can be applied in any field.

The following studies should be conducted in the study of galaxies in which the sleeves break into two or more parts.

### References

- [1] Ahejian, T. A. (1981). *Zviazdy halaktiki, metahalaktika [Stars of the galaxy, metagalaxy]*. Moscow: Nauka [in Russia].
- [2] Borshch, V. L. (2016). *Gidrodynamika, kosmogonia I kosmologia v rabotah V. I. Perehresta: ot planetarnuh vihrei do galaktik I temnoi energii [Hydrodynamics, cosmogony and cosmology in the works of V.I. Perehresta: from planetary vortexes to galaxies and dark energy]*. Visnuk DNU, Seria "Modeluvannia". – *Bulletin DNU, Seriya "Modeliuvnya", Tom 8(№ 8)*, 118-191.
- [3] Naginer, D. I. (2001). *Elementu kosmologii [Elements of cosmology]*. Sankt-Pitepbyrg. [in Russia].
- [4] Antonovuch, E. A. (Eds). (2004). *Narusna geometria. Praktikum [Descriptive geometry. Workshop]*. Lviv: Svit [inUkrainian].
- [5] Perehrest, V. I. (2017) *Zastosuvannia vuhrovoi teorii do doslidjennia tvolutsii shvudkosteï ta form galaktuk [Application of the vortex theory to the study of evolution of velocities and forms of galaxies]* Visnuk DNU, Modeluvannia – *Bulletin of DNU, Modeling, Tom 25 (Vup. 9, № 8)*, 178-192 [in Ukrainian].
- [6] Perehrest, V. I. (2016) *Kosmologichni naslidku vuhrovoi gidrodunamiku: vuhrova I temna energiia u kosmosi [Cosmological effects of vortex hydrodynamics: vortex and dark energy in space]* Visnuk DNU, Modeluvannia – *Bulletin of DNU, Modeling, Tom 24 (Vup. 8, № 8)*, 204-221 [in Ukrainian].
- [7] Savelov A. A. (1960) *Ploskie krivue. Sistematika, svoïstva, primeneniia [Flat curves. Systematics, properties, applications]*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoi literature [in Russia].

- [8] Kormendy J. Kennicutt, Robert C. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. / J. Kormendy, R. Kennicutt. // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2005. – vol. 42. №1. – P. 603–683.

## ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ РУКАВІВ ГАЛАКТИК МЕТОДАМИ НАРИСНОЇ ГЕОМЕТРІЇ

Тищенко С.С., Богданов Д.Ю.

### Реферат

У статті розглянуто моделювання рукавів галактики логарифмічними спіралями. Для цього центр полярної системи координат був розміщений в центрі галактичного ядра. Рукав галактики був графічно випрямлений середньою вигнутою лінією. Від полярного центру полярні промені проводились під рівними кутами до перетину із середньою лінією рукава. Отримані точки з'єднувалися відрізками. Вимірювання кутів між хордами та полярними променями показали, що ці кути рівні між собою. Оскільки кути між хордами та полярними променями рівні, а полярні кути рівні, трикутники, утворені суміжними полярними променями та хордами, подібні. Це означає, що вектор полярного радіуса пропорційний логарифму полярного кута і підпорядковується найпоширенішому закону в природному експоненціальному. Отже, логарифмічна спіраль знаходиться в основі рукавів галактики. Розглянуто вплив основних параметрів логарифмічної спіралі - початкового радіусного вектора та тангенсу кута між радіусним вектором та дотичною на форму спіралі від кола до прямої.

Встановлено, що кількість галактик, рукави яких закручуються за годинниковою стрілкою, дорівнює кількості галактик, рукави яких закручуються проти годинникової стрілки, що вказує на випадкове скручування рукавів під час формування. Оскільки кут між радіусним вектором і дотичною незначно відрізняється між галактиками, можна зробити висновок, що галактики складаються з одних і тих же елементів.

Запропоновано графічний метод моделювання логарифмічних спіралей, згідно з яким спочатку визначається приріст радіусного вектора, а потім цей приріст послідовно відкладається від радіусного вектора, коли він обертається на постійне збільшення полярного кута. Зростаючі кінці радіусного вектора утворюють логарифмічну спіраль. Оскільки алгоритм заснований на основних параметрах логарифмічної спіралі, він може бути застосований і в інших галузях.

### Література

1. Агемян Т. А. Звезды галактики, метagalactika. Москва: Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 415 с.
2. Борщ В. Л. Гидродинамика, космогония и космология в работах В.И. Перехреста: от планетарных вихрей до галактик и темной энергии. *Вісник Дніпровського національного університету. Сер. Моделювання*. 2016. Вип. 8. №8. С. 118–191.
3. Нагирнер Д. И. Элементы космологии. Санкт-Петербург, 2001. 55 с.
4. Антонович Є. А. Нарисна геометрія. Практикум. Львів : Світ, 2004. 528 с.
5. Перехрест В. І. Застосування вихрової теорії до дослідження еволюції швидкостей та форм галактик. *Вісник Дніпровського національного університету. Сер. Моделювання*. 2017. Вип. 9. Том 24. №8. С. 178–192.
6. Перехрест В. І. Космологічні наслідки вихрової гідродинаміки: вихрова і темна енергія у космосі / В. І. Перехрест. *Вісник Дніпровського національного університету. Сер. Моделювання*. 2016. Вип. 8. Том 24. №8. С. 204–221.
7. Савелов А. А. Плоские кривые. Систематика, свойства, применения. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. 293 с.
8. Kormendy J. Kennicutt, Robert C. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. / J. Kormendy, R. Kennicutt. // *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*. – 2005. – vol. 42. №1. – P. 603–683.



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185033

UDC 004.942:519.62: 519.683

**L.I. Korotka**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, korliv@hotmail.com

**O.S. Rott**, survare@hotmail.com

Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro

## INFORMATION SUPPORT OF MODELING FOR NONLINEAR DYNAMIC SYSTEMS BY COMPETITION OF SPECIES

*In the work the software toolkit for simulation modeling of nonlinear dynamical systems is developed and described. A class of tasks related to the competition of species is considered and has an applied value in natural, social, economic sciences, and others like that. Information support allows for qualitative research and analysis of systems on the models Lotka-Volterra, Jacob-Monod, Holling-Tanner. For their realization, one-and multi-step numerical methods are used. The software toolkit is equipped with visualization elements, in particular 2D and 3D graphics.*

**Keywords:** *nonlinear dynamical system; qualitative research; Lotka-Volterra; Jacob-Monod; Holling-Tanner.*

*У роботі розроблено та описано програмний інструментарій для імітаційного моделювання нелінійних динамічних систем. Розглянуто клас задач, які відносяться до конкуренції видів та мають прикладне значення у природничих, суспільних, економічних науках, тощо. Інформаційне забезпечення дозволяє проводити якісне дослідження та аналіз систем на моделях Лотки-Вольтерри, Жакоба-Моно, Холлінга-Теннера. Для їх реалізації застосовано одно та багатокрокові чисельні методи. Програмний інструментарій оснащено елементами візуалізації, зокрема, 2D та 3D графікою.*

**Ключові слова:** *нелінійні динамічні системи; якісне дослідження; Лотка-Вольтерра; Жакоба-Моно; Холлінга-Теннера.*

### Formulation of the problem

For modeling complex dynamic systems (DS) and processes is used to special software. There are a large number of software tools available for this type of task, such as GPSS, AnyLogic, Matlab, and many others. As you know, each of them has its own advantages and disadvantages, in particular, in the majority they solve a very wide range of tasks, have a powerful visual interface, but are quite expensive software, and in the case of free access (for example, the environment GPSS) solve a limited class of tasks. For the educational process, the need to study and research dynamic systems is quite relevant, so the development and creation of software tools to work with them is undeniable.

### Analysis of recent research and publications

As a rule, mathematical models in the form of differential equations and their systems, integral-differential equations, etc. are used for analytical description of dynamic systems [1—3], so numerical methods are generally used to solve them, for example: Runge-Kutta methods of different orders and their modifications, the Adams-Bashfort method and others. There are quite a number of papers devoted to numerical methods, for example [4], so the authors do not dwell on them separately.

It is known that the main components of nonlinear dynamic systems are: stability theory, dynamic chaos theory, ergodic theory, and integrated systems theory [5, 6]. Obviously, these components represent an entire scientific layer that cannot be grasped in one work, so the authors narrow the field of nonlinear dynamic systems and consider systems of competition of species. Note that nonlinear dynamic systems (species competition, in particular) are of sufficiently large applied value and are used in biology and medicine, economics and ecology, sociology and social sciences, etc. [5—8]. Mathematical models of such systems allow to quantify the status, functioning and dynamics of populations, their interaction.

### Formulation of the study purpose

Dynamic systems research is known to be possible using appropriate software products, some of which are described above. The purpose of the work is to create software that allows to obtain numerical solutions of DS using separate classes of numerical methods and has a visual interface. The



software contains a plugin system, each of which is a dynamic model that has its own data (model name, model formulas, its description, coefficients names, model roles, initial values of roles and parameters) and a numerical resolution algorithm. The main task of the work is the design and development of software tools for simulation modeling in order to study nonlinear dynamic systems of competition of species.

### Presenting main material

As you know, an integral element of modeling is a description of the structure and function of the system under development. Here is a list of structural elements that make up the system, the relationship between them and their functions:

1) working with external data. Ability to export the results of the program as a report for easy viewing and saving of settings in a file for further loading into the system;

2) work with plugins and dynamic models. Downloading plugins, that is, downloading .dll (for Windows) files from a special plugins directory into the system for further processing. Carrying out calculations with certain parameters passed to the plug-in instance, returning the calculation results for further processing in the system;

3) visualization of results. The results of the work after the calculations should be displayed in certain types (2D time-population diagram, 3D graph, results table, phase portrait of the system). It is possible to review the performance results for all or some of the numerical integration methods to perform calculations and research;

4) display controls. In order to work with the program, you must arrange the controls so that it is clear how to work with it. Main elements: Integration Control Panel (Beginning, End and Step Integration, Selection of the Dynamic Model), Panel of Initial Population Determination, Odds Panel (After Model Loading, It Fills Initial Values), 2D and 3D graphics, phase portrait, results table.

*Mathematical support.* Without limitation of judgments, the following nonlinear dynamic models are considered in the work: Lotka-Volterra; Holling-Tanner; Lotka-Volterra with logistic amendment; Jacob-Monod and Voltaire's "predator-victim-victim" (table 1).

Table 1. Mathematical models used in the work

Mathematical model of a dynamic system	Model options
Lotka-Volterra model: $\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(\alpha - \beta y) \\ \frac{dy}{dt} = -y(\gamma - \delta x) \end{cases}$	$x$ – the number of victims; $y$ – the number of predators; $\alpha$ – the birth rate of the victims; $\beta$ – the victim's meeting probability with the predator; $\gamma$ – the birth rate of predators; $\delta$ – the ratio of reduction in the number of predators.
Lotka-Volterra model with logistic amendment: $\begin{cases} \frac{dx}{dt} = (a - by)y - \alpha x^2 \\ \frac{dy}{dt} = (-c + dx)y - \alpha y^2 \end{cases}$	$a$ – the birth rate of the victims; $b$ – the meeting of victim's rate with the predator; $c$ – the birth rate of predators; $d$ – the ratio of reduction in the number of predators; $\alpha$ – the attenuation factor.
Holling-Tanner model: $\begin{cases} \frac{dx}{dt} = r \left( 1 - \frac{x}{K} \right) x - wy \frac{x}{D+x} \\ \frac{dy}{dt} = s \left( 1 - \frac{Jy}{x} \right) y \end{cases}$	$x$ – the number of victims; $y$ – the number of predators; $r, s, K, D, J$ – positive constants.

Continue of the table 1.

<p>Jacob-Monod model:</p> $\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \frac{Vy}{K+y}x \\ \frac{dy}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{Vy}{K+y}x \end{cases}$	<p><math>V</math> – the absorption rate;  <math>K</math> – the saturation factor;  <math>Y</math> – the number of bacteria per unit nutrients.</p>
<p>Model Volterra “predator-victim-victim”:</p> $\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = a_1x_1 - b_1x_1y \\ \frac{dx_2}{dt} = a_2x_2 - b_2x_2y \\ \frac{dy}{dt} = -cy - d_1x_1y + d_2x_2y \end{cases}$	<p><math>a_1, a_2</math> – the birth rate of the victims;  <math>b_1, b_2</math> – the meeting of victim's rates with the predator;  <math>c</math> – the predator mortality rate;  <math>d_1, d_2</math> – the fertility of predators.</p>

Note that without limitation of judgment, in the work are implemented of numerical methods of solving systems of differential equations are implemented: the Euler method; the fourth-order Runge-Kutta method; modified Euler method and Adams-Bashfort method. They are well known, do not require further explanation and are described in detail in the literature, for example [4].

*Results of numerical experiments.* As noted earlier, the software supports a plug-in system, benchmarking numerical integration methods, and generating work reports [9].

Let us dwell on a detailed overview of the program. During the program download, the program logo is displayed - the program starts and the welcome window (fig. 1).

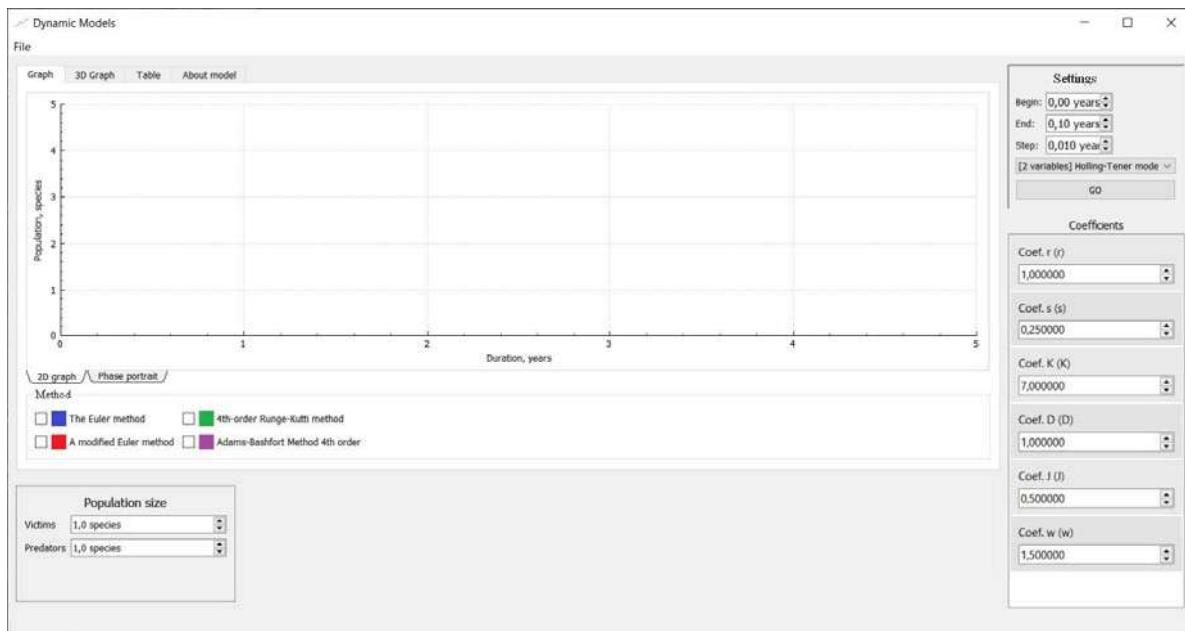


Fig. 1. The main program window

The main window is divided into several separate segments, corresponding to certain actions. One of the main panels in the program is the panel for selecting the model and adjusting its parameters (Fig. 1 top right). In order to improve and speed up the work of the software, all models are loaded before the main window appears. As defined earlier, the model is a plug-in, which is a special file that complements the program's capabilities. The plugins have a .dll extension (for Windows systems, un-

der Linux kernel operating systems, the .so extension for macOS - .dylib). The customization panel also allows the user to configure numerical integration options, such as changing the start and end times of simulation simulations.

The next panel that is present in the program is the coefficient panel (fig. 1, bottom right). By default, classic variants of their values are offered after the model is selected.

The central place is to the work area (figs. 1, 2), which displays the results of work with the selected model. The panel stores the elements (visualization panels) in separate tabs. The graph shows the process of changing species populations over time. The abscissa shows the duration in units of simulation (for example, years), and the ordinate axis is represents the number of each species at a given moment.

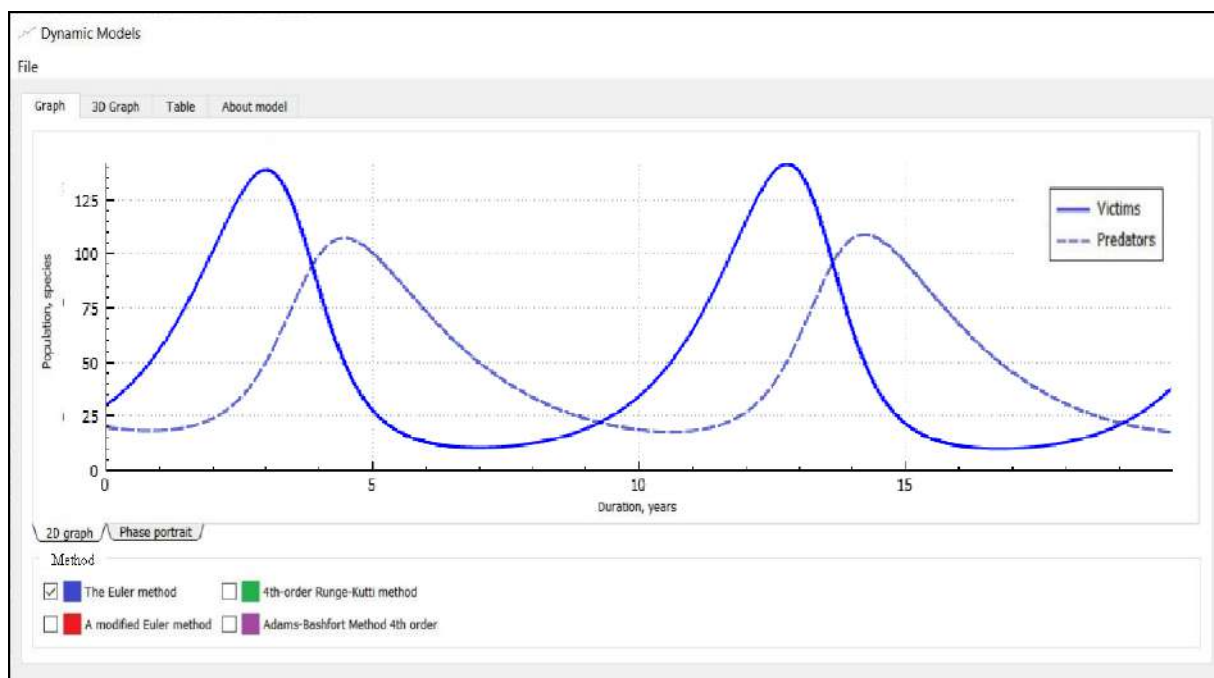


Fig. 2. 2D graph of results

The software interface contains a selection of numerical methods of the integration. As you know, each method has its own order of accuracy, so it is possible to perform a comparative analysis: switching them on or off at the same time. For clarity, methods are depicted in their colors. When working with graphs it is possible to move with the mouse in the graph, in addition, if necessary, you can reduce or enlarge parts of it. Without limitation, consider the model of the Lotka-Volterra (fig. 2). The solution is obtained using Runge-Kutta method the first-order (that is, the Euler method).

It is possible to construct a phase portrait of the system (fig. 3) on the example of the same Lotka-Volterra model. For models with three roles it is possible to construct 3D graphs (fig. 4).

The software allows you to perform qualitative research and analysis of models.

In particular, the use of software tools for the Lotka-Volterra model allows two stationary points to be obtained:

- 1) the number of predator and victims in populations is zero ( $x = 0, y = 0$ );
- 2) the number of predator and victims is  $x = \gamma / \beta, y = \alpha / \beta$ .

An analysis of the stability of stationary points shows that the first one (zero) is a saddle and the second one is a focus [5]. The Indicator Lyapunov exponent for focus is purely imaginary, so it is impossible to conclude from a linear analysis that the stability or instability of focus is impossible. However, for the Lotka-Volterra equations, there is an integral of motion that shows that the phase trajectories are closed curves, within which there is a focus [8].

The main feature of the Holling-Tanner model is that the oscillations are ultimately determined by the limit cycle of the phase portrait, which can be stable at  $s < r(K - D + 2) / K(D + 1)$ . It determines the amplitude of oscillations, which are set in a stationary mode of the system. In this case, the oscillations can either dampen over time and increase, while approaching stationary oscillations [8].

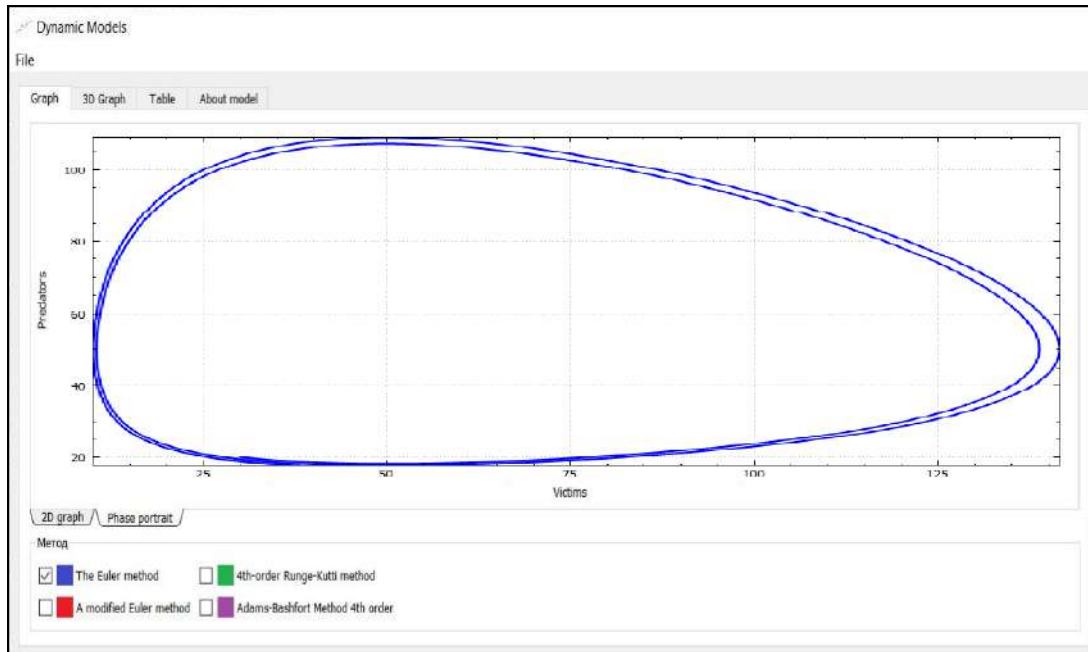


Fig. 3. The portrait of the system phase

For the Lotka-Volterra model with a logistic correction, the information system will give three points of equilibrium. An additional parameter in this model allows to control the damping of oscillations (oscillations) of the model.

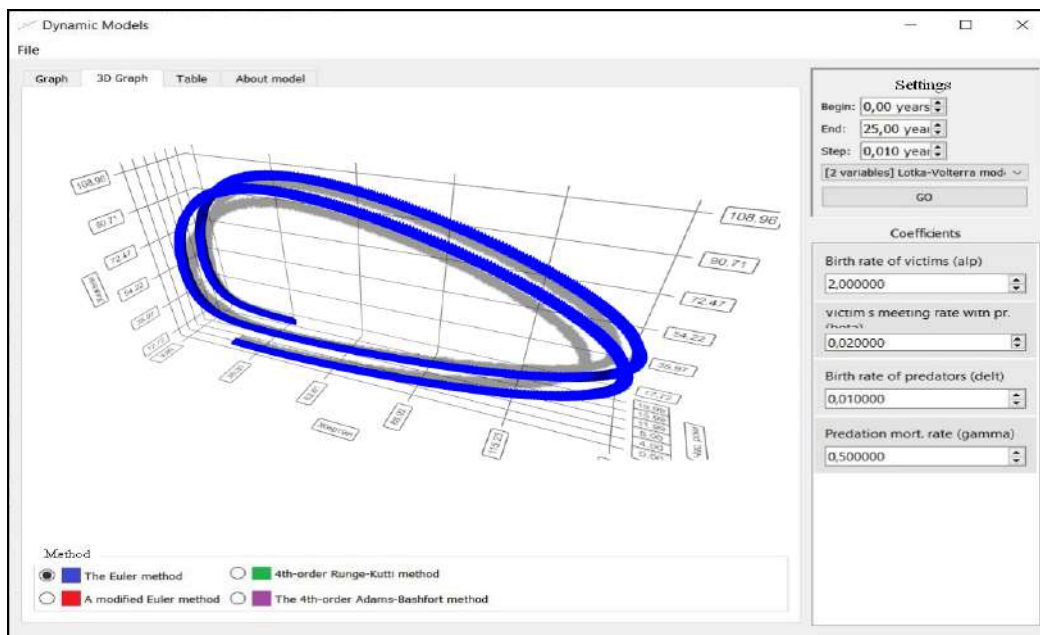


Fig. 4. 3D graph of simulation result

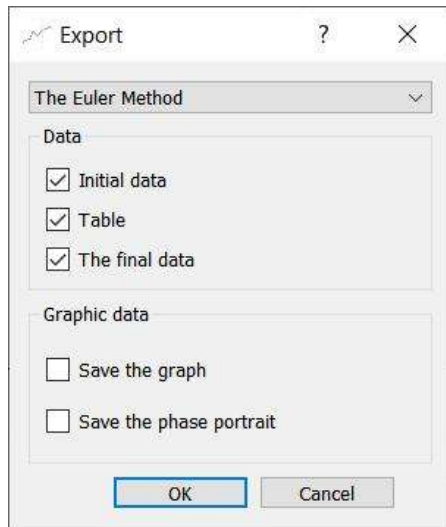


Fig. 5. The window of the save of the report

As it is easy to see, with these model parameters, the oscillatory process in it obviously dampens and a long equilibrium is established between the number of populations of predators and victims. The phase portrait acquires a steady focus, the shape of the phase portrait indicates a rather small linearity of this system. Therefore, the oscillations resemble a damped sine wave. Where  $\alpha < 0$  an unstable focus is formed and the oscillations begin to increase.

The steps of storing data step by step for further use and analysis are presented in fig. 5, 6.

The general description of each model, the description of its parameters, the phase portrait and its qualitative analysis are in a separate tab "About model".

The created software product enables: to carry out simulation modeling with models, choosing different methods of numerical integration; adjust model parameters and get experiment results; provides qualitative research of models and their analysis.

It should be noted that an operating system installer has been created to work with the software.

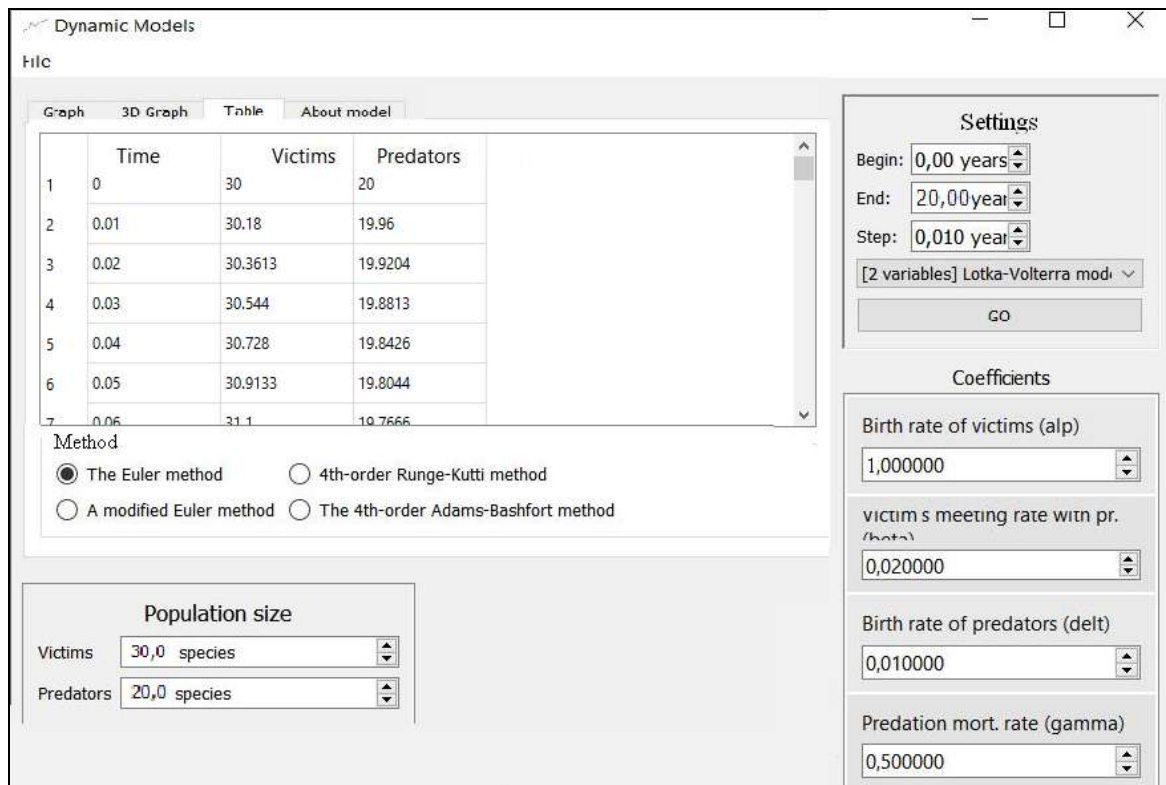


Fig. 6. The table of results

The user can choose not only the way to install the software product, create and display a shortcut on the desktop, the language of communication (Ukrainian, English, Russian), but also the operating system bit.

### Conclusions and prospects for further research

Scientific direction nonlinear dynamics of complex systems, including species competition, is of practical and applied importance in both humanities and natural sciences. Qualitative research and

analysis of such systems is impossible without the use of information technology. An information support system for simulation modeling is created in the work; structural and functional features of the information system are described; conceptual design and design of its logical model; system software (C++ programming language, Qt framework) described; its mathematical support (nonlinear dynamic models and numerical methods) is presented. The created software of simulation modeling of systems of competition of species, in particular, can be useful in the study of complex dynamic processes in different subject areas: economic, social, environmental and others, or in the educational process, which is confirmed by work [10].

### References

- [1] Holling-Tanner Predator-Prey Model with State-Dependent Feedback Control [Electronic resource] // *Discrete Dynamics in Nature and Society*; Jin Yang, Guangyao Tang, Sanyi Tang, 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/3467405> (date of appeal 26.05.2019). Screen name.
- [2] Complex Dynamical Behavior of a Predator-Prey System with Group Defense [Electronic resource] // *Mathematical Problems in Engineering*; Jianglin Zhao, Min Zhao, Hengguo Yu, 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/910349> (date of appeal 26.05.2019). Screen name.
- [3] Zelentsov D.G., Korotkaya L.I. *Tehnologii vyichislitel'nogo intellekta v zadachah modelirovaniya dinamicheskikh sistem: monografiya* [Technologies of computational intelligence in tasks of dynamic systems modeling: monograph]. Dnepr: Balans-Klub, 2018. 178 s. (DOI: <http://dx.doi.org/10.32434/mono-1-ZDG-KLI>). [in Russian].
- [4] Samarskiy A.A., Gulin A.V. *Chislennyye metody: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Numerical methods: allowance for universities]. M.: Nauka. Gl. red. fiz-mat. lit, 1989. 432 s. [in Russian].
- [5] Terehov S.V. *Fraktaly i fizika podobiya* [Fractals and similarity physics]. Donetsk: "Tsifrovaya tipografiya", 2011. 255 s. [in Russian].
- [6] Bazyikin A.D. *Nelineynaya dinamika vzaimodeystvuyuschih populyatsiy: uchebnik* [Nonlinear dynamics of interaction of populations: textbook]. Moskva-Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2003. 368 s. [in Russian].
- [7] Zaripov Sh.H., Nikonenkova T.V., Tolmacheva S.A. *Modeli dinamiki populyatsiy na osnove differentsialnykh uravneniy: realizatsiya v srede R* [Models of population dynamics based on differential equations: implementation in the environment R]. Kazan: Izd-vo Kazanskogo federal'nogo universiteta, 2017. 30 s. [in Russian].
- [8] Dyakonov V.P., Abramenkova, I.V., Penkov, A.A. *Osnovy matematiki i matematicheskoe modelirovanie. Chast 3* [Basics of Mathematics and Mathematical Modeling. Part 3]. Smolensk, Smolenskiy gosudarstvennyy pedagogicheskiy universitet, 2003. 198 s. [in Russian].
- [9] Rott O.S., Korotka L.I. *Informacijna pidsy'stema chy'sel'nogo rozv'yazannya sy'stemy` rivnyan` Lotky`-Vol'terry`* [Information subsystem of the numerical resolution of the systems Lotka-Volterra equations]. *Komp'yuterne modelyuvannya ta opty`mizaciya skladny`x sy`stem (KMOSS-2017) – Computer modeling and optimization of complex systems (CMOCS-2017)*, 2017. S. 149-151. (DOI: 10.32434/CMOCS-2017). [in Ukrainian].
- [10] Korotka L.I., Rott O.S. *Svidotstvo № 82774 pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir. Ukraina. Kompiuterna prohrama «Imitatsiine modeliuвання neliniinykh dynamichnykh system konkurentsii vydiv»* [Certificate № 82774 of registration of copyrights on the work. Ukraine. Computer program "Simulation of Nonlinear Dynamic Systems of Species Competition"]; stated 20.12.2018; published 25.01.2019, newsletter № 52. [in Ukrainian].

## ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ КОНКУРЕНЦІЇ ВИДІВ

Коротка Л.І., Ротт О.С.

### Реферат

У роботі розроблено та описано програмний інструментарій для імітаційного моделювання нелінійних динамічних систем. Розглядається клас задач, які пов'язані з конкуренцією видів. Такі задачі мають прикладне значення в природничих, соціальних, економічних науках тощо. Інформаційна підтримка дозволяє здійснювати якісне дослідження та аналіз систем на моделях Лотки-Вольтерри та її модифікацій, Жакоба-Моно, Холлінга-Теннера. Для їх реалізації використовуються одно- та багатокрокові чисельні методи.

Програмний продукт містить плагіни, кожен з них представляє собою динамічну модель, яка реалізує обчислювальний алгоритм та індивідуальні дані: назва моделі, подання формул моделі, її опис, назви коефіцієнтів, назви моделей ролей, початкові значення для параметрів та ролей. Структурними елементами та функціями інформаційної системи є:

- робота із зовнішніми даними: експорт результатів програми у вигляді звіту;
- робота з плагінами та динамічними моделями: завантаження файлів з розширенням .dll (наприклад, для Windows) зі спеціального каталогу «плагіни» в систему для подальшої обробки;
- обчислення з певними параметрами, які передаються екземпляру плагіна, повернення результатів обчислень для подальшої обробки в систему;
- візуалізація результатів: після обчислень відбувається відображення результатів (2D-діаграма час-популяція, тривимірний графік, таблиця чисельних результатів, фазовий портрет системи);
- відображення елементів управління: панель інтегрування, панель початкових вхідних даних та коефіцієнтів відповідної моделі, відрізок візуалізації (2D та 3D графіка, фазові портрети, таблиця результатів).

При розробці програмного інструментарію було виконано концептуальне проектування та проектування його логічної моделі. Описано системне програмне (мова програмування C++ та фреймворк Qt) та математичне забезпечення.

Створений програмний продукт імітаційного моделювання конкуренції видів може бути корисним при вивченні складних динамічних систем у різних предметних областях та в навчальному процесі.

### Література

1. Jin Yang, Guangyao Tang, Sanyi Tang Holling-Tanner Predator-Prey Model with State-Dependent Feedback Control. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2018. URL: <https://doi.org/10.1155/2018/3467405> (дата звернення: 26.05.2019).
2. Jianglin Zhao, Min Zhao, Hengguo Yu Complex Dynamical Behavior of a Predator-Prey System with Group Defense. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/910349> (дата звернення: 26.05.2019).
3. Зеленцов Д.Г., Короткая Л.И. Технологии вычислительного интеллекта в задачах моделирования динамических систем: монография. Днепр: Баланс-Клуб, 2018. 178 с. (DOI: <https://doi.org/10.32434/mono-1-ZDG-KLI>)
4. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: учеб, пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1989. 432 с.
5. Терехов С.В. Фракталы и физика подобия. Донецк: «Цифровая типография», 2011. 255 с.
6. Базыкин А.Д. Нелинейная динамика взаимодействующих популяций: учебник. Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. 368 с.
7. Зарипов Ш.Х., Никоненкова Т.В., Толмачева С.А. Модели динамики популяций на основе дифференциальных уравнений: реализация в среде R: учебно-методическое пособие. Казань: Изд-во Казанского федерального университета, 2017. 30 с.

8. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В., Пеньков А.А. Основы математики и математическое моделирование. Часть 3.: учебное пособие. Смоленск, Смоленский государственный педагогический университет, 2003. 198 с.
9. Ротт О.С., Коротка Л.І. Інформаційна підсистема чисельного розв'язання системи рівнянь Лотки-Вольтерри. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2017)*: матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 1-3 листопада 2017 року). Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2017. С. 149-151. (DOI: <https://doi.org/10.32434/CMOCS-2017>)
10. Свідоцтво № 82774 про реєстрацію авторського права на твір. Україна. Комп'ютерна програма «Імітаційне моделювання нелінійних динамічних систем конкуренції видів» / Л. І. Коротка, О. С. Ротт (Україна). – 3 с.; Опубл. 25.01.2019 р. Бюл. № 52.



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185037

UDC 004.4: 519.612.2

**I.I. Zhulkovska**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, inivzh@gmail.com

**O.A. Zhulkovskyi**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, olalzh@ukr.net

**E.A. Suhal**, student, lamse3@gmail.com

Dniprovsk State Technical University, Kamianske

## ESTIMATION OF COMPUTING ALGORITHMS QUICKLY DEVELOPMENT BY USING HIGH-PRECISION ARITHMETIC SOFTWARE

*One of the ways to reduce the computational error of computer simulation results is the use of software tools implemented in specialized libraries of high-precision arithmetic of modern universal high-level programming languages, which is associated with a significant increase in the duration of the computational experiment. This paper is devoted to the study of the degree of influence of a given computational accuracy on the speed of the software implementation of a method for solving a SLAE of a different order and with different digit capacity of coefficients using modern means of high-precision computation of the Java language.*

**Keywords:** computational error; high-precision computational tools; computation speed; software implementation; SLAE solution.

*Одним з напрямків зниження обчислювальної похибки результатів комп'ютерного моделювання є використання програмних засобів, реалізованих в спеціалізованих бібліотеках високоточної арифметики сучасних універсальних мов програмування високого рівня, що пов'язано із значним збільшенням тривалості обчислювального експерименту. Справжня робота присвячена дослідженню ступеня впливу заданої обчислювальної точності на швидкість програмної реалізації методу рішення СЛАР різного порядку і з різною розрядністю коефіцієнтів при використанні сучасних засобів високоточних обчислень мови Java.*

**Ключові слова:** обчислювальна похибка; високоточні засоби обчислень; швидкість обчислень; програмна реалізація; чисельне рішення СЛАР.

### Formulation of the problem

The modern development of computer technology and computer modeling practically does not leave room for expensive and difficult to carry out physical experiments. That is why a computational experiment has become the most widespread and relevant method of studying all kinds of objects and processes in engineering and technology.

The solution of modern problems, formalized in the form of mathematical models, requires resource-intensive calculations over huge data arrays, the processing of which involves a colossal (sometimes even unacceptable for a particular computing architecture) number of iterations. In calculations with limited bit depth (and most modern computing systems are built on the basis of CPUs that support 64-bit machine arithmetic of the IEEE-754 standard [1] with 53 digits of the mantis), a rounding error can occur at each calculation step. At the same time, the accuracy of machine calculations becomes unsatisfactory, and the computational error becomes a determining factor in obtaining adequate results of computer modeling.

Thus, the researchers are facing the urgent task of reducing the size of the computational error associated with the limited representation of chips in the computer, which, in turn, is associated with a significant increase in the duration of the computational experiment and a decrease in its efficiency.

### Analysis of recent research and publications

One of the modern ways to improve the accuracy of calculations is the 128-bit IEEE-format, in which the mantissa field is expanded to 113 bits. However, hardware support of this format is very expensive [2].

A more common way to reduce computational error is to use software tools implemented in specialized libraries of high-precision arithmetic of modern high-level universal programming lan-

guages. So, now a lot of software packages have been developed that provide both enhanced (128- or 256-bit arithmetic) and arbitrary computational accuracy.

Currently, there is a fairly wide range of such tools, the most famous of which are the following.

1. QD [3] — an advanced precision package that supports two data formats: double-double (mantissa 106 bits or approximately 32 decimal digits) and quad-double (mantissa 212 bits or approximately 64 decimal digits); It has high-level interfaces of the C ++ and Fortran-90 languages, which ensures the conversion of existing programs with minimal change in the source code.

2. ARPREC [3] — a package of arbitrary accuracy, including arithmetic calculation procedures, as well as many algebraic and transcendental functions; supports calculations with real, integer and complex numbers; has C ++ and Fortran-90 interfaces.

3. GMP [4] — a library of arbitrary accuracy, which has an extensive set of optimized procedures to support calculations with integers, rational and real numbers; rounding modes compatible with IEEE-754 specifications are not supported; has a C language interface.

4. MPFR [5] — GMP extension that provides multiple precision calculations with the possibility of using one of four rounding modes that comply with the IEEE-754 standard; accuracy can be set separately for each variable; Normalized numbers are not supported. released under the GNU LGPL license; possesses high speed in comparison with many analogs.

5. NTL [6] — portable C ++ — a library for solving problems of number theory, including data structures and algorithms for processing integers of any length, vectors, matrices and polynomials over integers and over finite fields, as well as arbitrary precision floating-point arithmetic; NTL's virtue is its consistent interface with a wide variety of classes representing mathematical objects.

6. MPFUN2015 [7] — a package of arbitrary accuracy, which is a development of MPFUN90, having a Fortran-90 language interface; partial support for the C ++ interface is planned; supports real and complex data types; the main declared advantages of the package include streaming security, to maintain acceptable performance when operating in extremely high accuracy, algorithms based on fast Fourier transform are used; the package includes routines for calculating algebraic, transcendental and some special functions, such as gamma function, incomplete gamma function, zeta function.

However, the classical methods of long arithmetic [8], which underlie the majority of well-known packages (GMP, MPFR, ARPREC, QD, NTL, etc.), lead to fairly slow and inefficient implementations. The fundamental reason for this is the emergence of hyphenation chains, due to which multi-bit mantissa processing algorithms become computationally complex and do not parallelize. As a result, high-precision calculations are accompanied by a large investment of time and inefficient use of computing resources.

#### **Study goal statement**

In [9—13], studies of the effectiveness of modern software tools for supporting high-precision calculations with real numbers for C / C ++ languages are quite widely presented. Other, listed above, software tools for the implementation of high-precision arithmetic are practically not considered in scientific publications.

The aim of this work is to study the degree of influence of a given accuracy on the speed of computational algorithms using modern means of high-precision arithmetic of the Java language. Java is selected as the most popular and demanded (according to the current ratings like TIOBE [14] or domestic DOU.UA) programming language.

#### **Statement of the main material**

To represent real numbers in Java, standard, hardware-supported, data types are used — float (precision 23 bits, 7 decimal places) and double (precision 53 bits, 16 decimal places).

To implement arithmetic with the desired (specified) accuracy, Java introduced the specialized `BigDecimal` class, which is a descendant of the `java.lang.Number` class and represents a floating-point number of arbitrary length and accuracy. `BigDecimal` is located in the `java.math` package. Each object of this class stores two integer values - the mantissa of a real number in the form of an object of class `BigInteger` and the non-negative decimal order of a number of type `int`. `BigDecimal` contains methods that duplicate standard Java arithmetic operations. When working with `BigDecimal` values, you can specify the desired precision (i.e., the number of decimal places).

When conducting a computational experiment [15], the time of the software implementation of the classical right-sweep method [16] was studied, which is a special case of the Gauss method applied to systems of linear algebraic equations (SLAE) with a three-diagonal matrix. Such systems are often found in the numerical solution of boundary value problems for differential equations of the second order in various problems of mathematical physics, in modeling some engineering problems, and also when solving problems of spline interpolation.

In the process of research, the matrix size was varied in the range  $1 \leq n \leq 2 \cdot 10^7$ , and the coefficients of the equation were generated randomly (taking into account the conditions for the diagonal prevalence of the matrix). In comparative calculations, we used standard valid data types: float (precision 23 bits, 7 decimal places), double (precision 53 bits, 16 decimal places) and the BigDecimal data type with similar precision (8 and 16 decimal places).

Computational experiments were carried out using the infrastructure shown in table 1.

Table 1. Computing experiment infrastructure

Processor (CPU)	Intel Core i5-7400 (4 cores, 3-3.5 GHz), cache 6 MB
Memory (RAM)	Kingston HyperX DDR4 (8GB, 2133 MHz, 17000 MB/s) + Kingston HyperX DDR4 (8GB, 3200 MHz, 23500 MB/s)
Operating system (OS)	Microsoft Windows 7
Development Environment (IDE)	Eclipse Java 2018-12
Development Kit (JDK)	1.8

So, the study of the solution time for SLAEs (Time, s) in the above range of order (n) using standard valid data types showed (Fig. 1) a slight ( $3 \leq n \leq 4 \cdot 10^7$  s) linear reduction in the time of the program implementation of the sweep method for the hardware-supported double type in comparison with the less accurate standard type float.

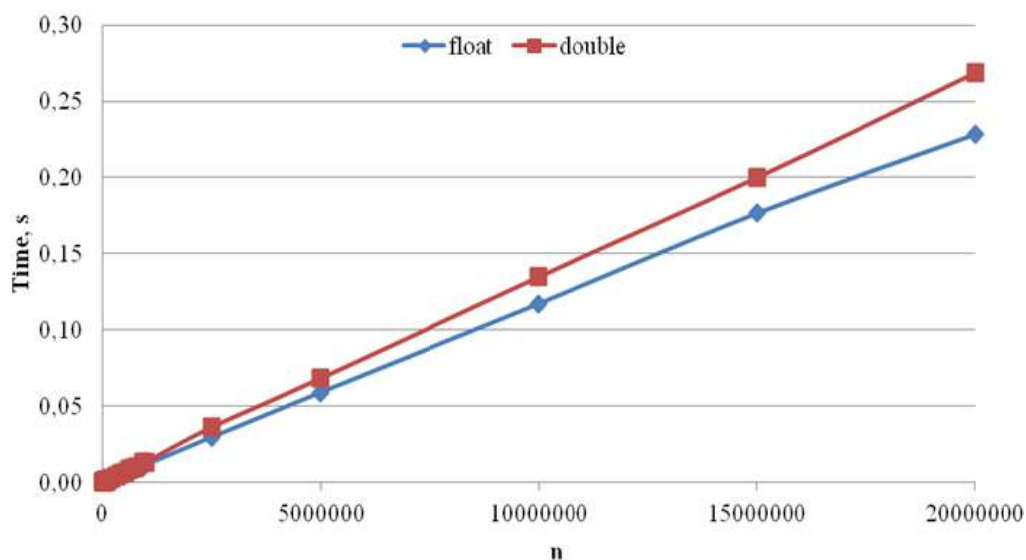


Fig. 1. Dependence of the solution time on the SLAE order for standard data types

In this case, the ratio of the calculation time when using the more accurate of these types to the calculation time for the less accurate type in the indicated range of order SLAE was 1.02–1.31 in the absence of a linear relationship.

In turn, if we compare the specialized types of Java software support BigDecimal-8 and BigDecimal-16, similar in accuracy (Fig. 2), then the software implementation of the sweep method for the more accurate of these types compared to the less accurate in the given range of order changes of SLAE was  $2.3 \cdot 10^{-2}$ – $3.4 \cdot 10^1$  s.

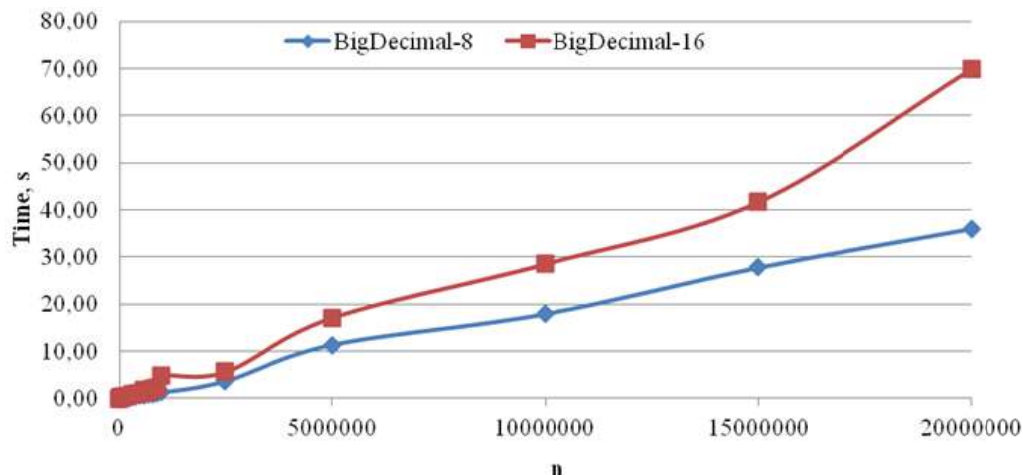


Fig. 2. The dependence of the solution time on the SLAE order for specialized data types

Moreover, the ratio of the calculation time when using the more accurate BigDecimal-16 type to the calculation time for the BigDecimal-8 type in the indicated range of the order of SLAEs was 1.5–7.3 in the absence of a linear relationship.

However, the most interesting results in this study are the results presented in Fig. 3, namely, the ratio of the speed of the standard hardware and specialized software implementation of calculations with huge (up to  $2 \cdot 10^7$ ) arrays of high-precision data.

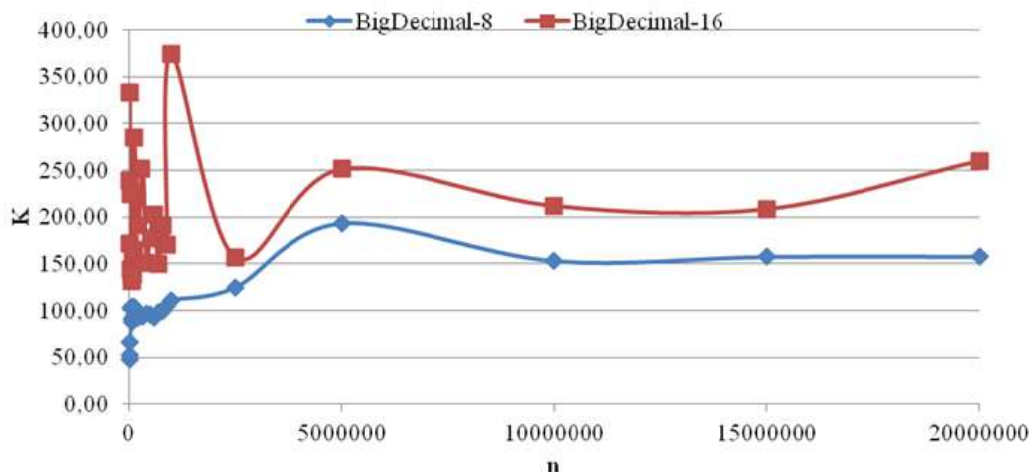


Fig. 3. Dependence of the performance drop coefficient on the order of SLAE for specialized data types

So, performance drop factors:

$$K_{BigDecimal-8} = T_{BigDecimal-8} / T_{float} ,$$

$$K_{BigDecimal-16} = T_{BigDecimal-16} / T_{double} ,$$

where, and - the SLAE solution time for the types BigDecimal-8, BigDecimal-16, float and double, respectively, significantly increase with the accuracy of the type used, i.e. there is a significant (maximum 374 times) decrease in the speed of the computational experiment. The calculated value in the studied range of changes in the order of the matrix was 48—193, and 131—374.

The present studies did not reveal a strict mathematical relationship between the decrease in the speed of the algorithm for the numerical implementation of the sweep method and the order of SLAEs, and this dependence becomes more pronounced with an increase in  $n$  from 25 Ч 105.

### Conclusions and prospects for further research

The use of modern software to improve the accuracy of computer modeling is associated with a significant (several hundred times) reduction in the speed of a numerical experiment, which requires a choice between the speed of implementation of the computer model and its acceptable adequacy.

It is planned to further develop similar studies to ensure arbitrary (higher — from 16 decimal places) accuracy of the processed data, as well as the study of other hardware and software tools for implementing resource-consuming computational processes.

### References

- [1] IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. (2008). Introduced 29 August 2008. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers [in Russian].
- [2] Bailey D. H., Borwein J. M. High-Precision Arithmetic: Progress and Challenges [Electronic resource]. - Access Mode: <http://www.davidhbailey.com/dhbpapers/hp-arith.pdf>
- [3] Bailey D. H. High-Precision Software Directory [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.davidhbailey.com/dhbsoftware> [in Russian].
- [4] The GNU Multiple Precision Arithmetic Library [Electronic resource]. – Access mode: <https://gmplib.org> [in Russian].
- [5] The GNU MPFR Library [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.mpfr.org> [in Russian].
- [6] NTL: A Library for doing Number Theory [Electronic resource]. – <http://www.shoup.net/ntl> [in Russian].
- [7] MPFUN2015: A Thread-Safe Arbitrary Precision Computation Package (FullDocumentation) [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.davidhbailey.com/dhbpapers/mpfun> [in Russian].
- [8] Brent R. Modern Computer Arithmetic / R. Brent, P. Zimmermann.(21010) – New York, NY: Cambridge University Press, 236 [in Russian].
- [9] Opanasenko, V.M., Khimich, O.M., Lisovy, O.M., Chistyakova T.V.(2011). *Razv'yazannya tasks with numbered accuracy of calculation* / Control systems and machines [in Ukrainian].
- [10] Khimich, A. , Nikolaevskaya, E, Chistyakova, T (2012) *B Programming with Multiple Precision*. / Berlin: Springer – Verlag [in Ukrainian].
- [11] Isupov, K. S. , Ivanov, A. G.(2012) *Study of the effectiveness of modern means of supporting high-precision calculations with real numbers* // "Society, Science, Innovations (NTK-2012)": Sat. materials. Section "Computing systems and software for data and knowledge." - Kirov: Vyatka State University [in Russian].
- [12] Isupov, K. S., Knyazkov, V. S. (2015) *Library of multiple precision parallel arithmetic for high-performance systems* // Supercomputer days in Russia: Tr. International Conference (2015, September 28–29 Moscow) .– CEUR Workshop Proceedings: CEUR-WS.org, – T. 1482 [in Russian].
- [13] Isupov, K., Knyazkov, V. A.(2015) *Modular-Positional Computation Technique for Multiple-Precision Floating-Point Arithmetic* // Parallel Computing Technologies, ser. LNCS. – Cham, Switzerland: Springer International Publishing. – Vol. 9251. – P. 47–61 M [in Ukrainian].
- [14] TIOBE Programming Community Index for May 2019 [Electronic resource]. – Access Mode: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/> [in Ukrainian].

- [15] Zhulkovska, I., Suhal, E., Zhulkovskyi, (2019) O. *Analysis of the use of software approaches to reducing the computational error of the simulation results* // Zbirnik tez VI All-Ukrainian science.-practical. conf. young scientists "Information Technology – 2019". – К.: Kyiv. un-t im. B. Grinchenka, 2019. – P. 117, 118 [in Ukrainian].
- [16] Samarsky, A. A. *Theory of difference schemes*. – М.: Nauka, 1989. – 616 p [in Russian].

## ОЦІНКИ ШВИДКОДІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ВИСОКОТОЧНОЇ АРИФМЕТИКИ

Жульковская І.І., Жульковский О.О., Сугаль Є.О.

### Реферат

Сучасний розвиток обчислювальної техніки та комп'ютерного моделювання практично не залишають місця для дорогих і важко здійснених фізичних експериментів. Саме тому обчислювальний експеримент став найбільш поширеним методом дослідження всіляких об'єктів і процесів в техніці і технологіях. В даний час перед дослідниками стає актуальною задача зниження розмірів обчислювальної похибки, пов'язаної з обмеженістю представлення чисел в ЕОМ, що, в свою чергу, пов'язано із значним збільшенням тривалості обчислювального експерименту і зниженням його ефективності.

Метою даної роботи є дослідження ступеня впливу заданої точності на швидкодію обчислювальних алгоритмів при використанні сучасних засобів високоточної арифметики мови Java.

При проведенні обчислювального експерименту досліджувався час програмної реалізації класичного методу правої прогонки, що застосовується до систем лінійних алгебраїчних рівнянь з тридіагональною матрицею.

У процесі досліджень розмір матриці змінювали в діапазоні  $10^3$ — $2 \cdot 10^7$ , а значення коефіцієнтів рівняння генерували випадковим чином (з урахуванням умови діагонального переважання матриці). У порівняльних розрахунках використовували стандартні дійсні типи даних: float (точність 23 біта, 7 десяткових знаків), double (точність 53 біта, 16 десяткових знаків) і тип даних BigDecimal з аналогічними точностями (8 і 16 десяткових знаків).

Використання сучасних програмних засобів підвищення точності комп'ютерного моделювання пов'язане із значним (в кілька сотень разів) зниженням швидкості чисельного експерименту, що вимагає вибору між швидкістю реалізації комп'ютерної моделі і її прийнятною адекватністю. Планується подальший розвиток аналогічних досліджень для забезпечення достатньо високої (більш високою – від 16 десяткових знаків) точності оброблюваних даних, а також використання інших апаратних і програмних засобів реалізації подібних обчислювальних процесів.

### Література

1. IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic. Introduced 2008-08-29. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008. 70 p.
2. Bailey D. H., Borwein J. M. High-Precision Arithmetic: Progress and Challenges [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.davidhbailey.com/dhbpapers/hp-arith.pdf>
3. Bailey D. H. High-Precision Software Directory [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.davidhbailey.com/dhbsoftware>.
4. The GNU Multiple Precision Arithmetic Library [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://gmplib.org>.
5. The GNU MPFR Library [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.mpfr.org>.
6. NTL: A Library for doing Number Theory [Електронний ресурс]. <http://www.shoup.net/ntl>.

7. MPFUN2015: A Thread-Safe Arbitrary Precision Computation Package (FullDocumentation) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.davidhbailey.com/dhbpapers/mpfun2015.pdf>.
8. Brent R., Zimmermann P. *Modern Computer Arithmetic*. New York, NY: Cambridge University Press, 2010. 236 p.
9. Розв'язання задач с підвищеною точністю обчислень / В. М. Опанасенко, О. М. Хіміч, О. М. Лісовий, Т. В. Чистякова // *Управляющие системы и машины*. – 2011. – № 1. – С. 9 – 18.
10. Khimich A., Nikolaevskaya E., Chistyakova T. *Programming with Multiple Precision*. Berlin: Springer–Verlag, 2012. 206 p.
11. Исупов К. С., Иванов А. Г. Исследование эффективности современных средств поддержки высокоточных вычислений с вещественными числами. «Общество, наука, инновации (НТК-2012)»: Сб. материалов. Секция «Вычислительные системы и программное обеспечение для данных и знаний». Киров: ВятГУ, 2012. 11 с.
12. Исупов К. С., Князьков В. С. Библиотека параллельной арифметики многократной точности для высокопроизводительных систем // *Суперкомпьютерные дни в России: Тр. Международной конференции (28–29 сентября 2015 г. г. Москва)*. CEUR Workshop Proceedings: CEUR-WS.org, 2015. Т. 1482. С. 110–121.
13. Isupov K., Knyazkov V. A Modular-Positional Computation Technique for Multiple-Precision Floating-Point Arithmetic. *Parallel Computing Technologies, ser. LNCS*. – Cham, Switzerland : Springer International Publishing. – 2015. Vol. 9251. P. 47–61.
14. TIobe Programming Community Index for May 2019 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>
15. Zhulkovska I., Suhal E., Zhulkovskyi O. Analysis of the use of software approaches to reducing the computational error of the simulation results // *Збірник тез VI Всеукр. наук.-практ. конф. молодих науковців «Інформаційні технології – 2019»*. Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2019. С. 117–118.
16. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. М.: Наука, 1989. 616 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185038

UDC 631.312.021.4:631.312.001.1

**S.S. Tishchenko**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Environmental Mathematics Department, voloskrs@i.ua

Dnipro State University of Agriculture and Economics, Dnipro

## MODELING OF EXPANDING SURFACES, WHICH INCIDENT BY TWO DIRECT DRIVE CURVES

*The geometric model of the expanding surface which is incident to two direction curves is considered. On the basis of the developed model, the conditions for the existence of the surface are derived, which makes it possible to apply the developed model to the design of machine-building products, in particular those working in a dense environment.*

**Keywords:** geometry; surface; expansion surfaces; model; working bodies.

*Розглянуто геометричну модель розгортної поверхні яка інцидентна двом напрямним кривим. На основі розробленої моделі виведено умови існування поверхні, що дає змогу застосувати розроблену модель при проектуванні машинобудівних виробів, зокрема таких, що працюють у щільному середовищі.*

**Ключові слова:** геометрія; поверхні; розгортні поверхні; модель; робочі органи.

### Formulation of the problem

For multi-nomenclature machine-building production the most important of the technological equipment is machining, the optimum service life does not exceed for 7 years. This equipment includes working bodies that work in dense environments: these are excavator buckets, bulldozer shelves, general-purpose and special-purpose plows, and many others that work in soil. At the heart of such working bodies is a surface that can be quite complex. An analysis of the working methods of working bodies shows that in the early stages of design it is very difficult to assess and take into account the variety of factors that affect the quality of its work. Therefore, there is a problem of choosing the design and technological parameters of the surfaces, in order to ensure the technological purpose of the working body. At the same time, there is no scientific and methodological base, including generalized surface models, which allows taking into account the design and technological features of the working bodies that are being designed. Thus, the development of surface models that allow the design of working bodies to work in a dense environment is a broad spectrum solution to an important problem.

### Analysis of recent research and publications

One of the main directions of applied geometry development is the design of surfaces that meet different positional, metric, and differential conditions. At present, in these areas, certain results are obtained, which stand at the level of modern requirements, design engineering. In [1, 8], geometric models of ruler surfaces with multivariable sets of lines and special surface lines are presented, but a large number of parameters and difficult definition of special lines, for example, curvature lines complicate the design of working bodies. In [9, 10, 11] geometrical models of surfaces of soil tillage working bodies, in particular plows of agricultural purpose are considered. The disadvantage of these models is to specify them for a specific working body, and the application of the model for another working body is much more difficult. This leads to the fact that in the design of the working body in each case, you need to develop your algorithm for surface formation.

The main directions of development of analytical design of surfaces are formulated by II Kotov [2, 3] and consist in the development of methods of constructing lined surfaces, their continuous frames with observance of given differential-isometric conditions. Strengthening requirements for precision characteristics, increasing the speed and the need to improve the dynamic characteristics of the interaction of surfaces with a dense environment further complicate the required geometry of the surfaces. For example, for operated surfaces in dense environments or at high speeds.



The above causes the urgent need to develop new methods for obtaining mathematical models of surfaces that meet a large number of differential-geometric conditions with a given degree of accuracy. The energy costs thus depend on the geometric properties of the surfaces.

The use of working bodies with expandable surfaces is widespread in technology. This position is provided by the differential-parametric properties of the unfolding surfaces:

- the tangent plane touches the surface along the whole rectilinear formation and does not change its position in space when the point of contact changes;
- normal to the surface when moving the point of contact along the formation does not change its position.

Working bodies with unfolding surfaces have the advantage over non-expandable ones, first of all, because at the unfolding surface, the working body is made by a simple bend that eliminates plastic deformations, which leads to a violation of the shape of the surface. Secondly, if the working body is working in a dense environment, it has less traction resistance, because on the unfolding surface the dense medium will move more orderly because at each instant of time the unfolding surface is a plane.

Particularly noteworthy is that working bodies with expandable surfaces have linear wear due to their properties.

The greatest contribution to the theory of unfolding surfaces was made by V. M. Naidysh [5, 6]. Based on the differential properties of the unfolding surfaces, he developed a number of algorithms for their design. In [7] adaptation of tillage working bodies to certain conditions is given

These algorithms are generic in nature, so detailing them to save significant material and energy costs when designing and manufacturing working bodies is an important task.

#### **Formulation of the purpose of the study**

The purpose of the work is to provide rational choice of the parameters of the model of the unfolding surface when designing process equipment using automated systems.

The object of research is the design of surfaces of working bodies of machining and technological equipment, and working bodies of machines operating in conditions of dense environments, and made of structural materials of general mechanical engineering purpose.

The paper deals with the geometric model of a linear unfolding surface, the conditions of existence of such a surface, and presents a generalized algorithm for constructing a surface, regardless of the type of working body or engineering product.

#### **Presenting main material**

To develop a surface model, we define a Cartesian coordinate system  $Oxyz$ . In this system we define two curves:

$$m: x = x_1(u), y = y_1(u), z = z_1(u), \quad (1)$$

$$n: x = x_2(v), y = y_2(v), z = z_2(v), \quad (2)$$

where  $u$  and  $v$  — parameters.

These curves distinguish from the set of direct congruences

$$y = ax + b, \quad z = cx + d. \quad (3)$$

In this case, the position parameters  $a, b, c, d$  depend on  $u$  and  $v$  and are determined from the system of equations (1), (2), (3), so that

$$a = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}; \quad b = y_1 - ax_1; \quad (4)$$

$$c = \frac{z_1 - z_2}{x_1 - x_2}; \quad d = z_1 - cx_1. \quad (5)$$

To remove the expanding torso surface, we introduce an additional condition in the form of compatibility, equations defining the equipment of both curves by the norms of the future surface,

$$\begin{cases} z'_1 = p \cdot x'_1 + q \cdot y'_1 \\ z'_2 = p \cdot x'_2 + q \cdot y'_2 \end{cases} \quad (6)$$

where the strokes denote the derivatives of the functions that set the curves by their parameter and the differential equation of the linear surface

$$p + aq - c = 0,$$

which is equivalent to the equation

$$\begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \end{vmatrix} = 0. \quad (7)$$

Equation (6) expresses the fact that the surface normal at the corresponding points of the given curves (which belong to one straight line) are parallel, which is equivalent to having a common tangent plane to the surface at the indicated points. Indeed, given (4) and (5), equation (8) takes the form

$$\begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 & z'_1 \\ x'_2 & y'_2 & z'_2 \\ x - x_2 & y - y_2 & z - z_2 \end{vmatrix} = 0, \quad (8)$$

that is, the vectors tangent to the curves and the generic coplanar.

Equation (8) allows us to determine the dependence between the parameters  $u$  and  $v$  on the surface unfolding condition

$$\varphi(u, v) = 0, \quad (9)$$

which together with (3), (4), (5) gives the equation of the search surface.

If one of the parameters (such as  $u$ ) can be explicitly expressed in (9) through the second parameter,

$$u = \varphi_1(v), \quad (10)$$

then, given (4), (5) and (10), the surface equation will look like

$$y = a(v) \cdot x + b(v), \quad z = c(v) \cdot x + d(v). \quad (11)$$

To find the edge of  $l$ , we differentiate (11) by  $v$

$$x = \frac{b'(v)}{a'(v)} = -\frac{d'(v)}{c'(v)}. \quad (12)$$

One of equations (12) in conjunction with (11) defines  $l$ .

Obviously, not every two lines in their shape and position in space will allow for a torso surface. In solving the determinant (9), the following cases can occur (except for the one discussed above, which leads to (9)):

- the determinant is equal to zero (the curves are in the same plane, which is the desired surface regardless of the function  $\varphi$ );

- as a result of decoupling (8) it becomes an equation from one parameter (there is no torso surface, there are separate generators whose number is equal to the number of roots of equations where there is a common tangent plane to the given curves);

- the determinant (8) is not zero (the torso surface does not exist).

Thus, the desired result is only the case leading to (9).

Consider equations (6) and (8). The minors  $2 \times 2$  of the first two lines of the determinant (8) are the coordinates of the surface normal  $\vec{n} \{ \Delta x, \Delta y, \Delta z \}$ , so

$$p = \frac{-\Delta x}{\Delta z}, \quad q = \frac{-\Delta y}{\Delta z}, \quad (13)$$

where

$$\Delta x = -\begin{vmatrix} y'_1 & z'_1 \\ y'_2 & z'_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta y = \begin{vmatrix} x'_1 & z'_1 \\ x'_2 & z'_2 \end{vmatrix}; \quad \Delta z = \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 \\ x'_2 & y'_2 \end{vmatrix}.$$

Surface design is greatly simplified if the guide curves are level lines. For example, if  $m$  and  $n$  are horizontal, then the condition of surface unfolding is  $\Delta z = 0$ , and for the fronts  $\Delta y = 0$ , etc.

Equation (7) allows one of the functions, for example, (2), to be defined to satisfy the existence of a spreading surface. In this case, the functions  $x_1, y_1, z_1$  and  $x_2, y_2$ , and, must be known.

Write equation (8) as follows

$$A \begin{vmatrix} y'_1 & z'_1 \\ y'_2 & z'_2 \end{vmatrix} - B \begin{vmatrix} x'_1 & z'_1 \\ x'_2 & z'_2 \end{vmatrix} + (z_1 - z_2) \cdot C = 0,$$

where  $A = x_1 - x_2$ ,  $B = y_1 - y_2$ ,  $C = \begin{vmatrix} x'_1 & y'_1 \\ x'_2 & y'_2 \end{vmatrix}$ .

From the obtained expression we arrive at a differential equation of a relatively unknown function

$$z'_2 - \frac{C}{F} z_2 = 0, \quad (14)$$

where  $F = (A \cdot y'_1 - B \cdot x'_1) - A \cdot y'_2 \cdot z'_1 - B \cdot z'_1 \cdot x'_2 + C \cdot z'_1$ .

#### Surface construction algorithm

1. We select the curves  $m$  and  $n$  (equations (1) and (2)) according to the technological process. For example, for the design of a general-purpose plow shelf, these can be trajectories of the chuck motion.

2. Find the generators  $x'_1, y'_1, z'_1, x'_2, y'_2, z'_2$ .

3. We construct the determinant (8) as a result of the solution which we find (9). If dependence (9) on the determinant (8) does not follow, then there is no solution.

4. We determine the coefficients  $a, b, c, d$  according to (4) and (5).

5. Find  $a, b, c, d$  with (9).

6. Write the equation of the surface (3) which will be given by the set of rectilinear generators.

According to the specified model, a semi-screw general-purpose plow shelf is constructed in which the formation in each position will be determined by two angles of inclination to the projection planes.

The coordinate system  $Oxyz$  is chosen such that the axis  $Ox$  is directed opposite to the movement of the plow body, the axis  $Oy$  is located in the horizontal plane and the axis is vertical. With this arrangement of the surface, the angle of projection of the genera on the horizontal plane of projections  $Oxy$  is denoted by  $\gamma$  the angle of projection of the genera to the axis  $Ox$  on the vertically longitudinal plane through  $\beta$ . Surface diagram and function graphs  $a(x) = tg\gamma(x)$  та  $b(x) = tg\beta(x)$  are presented in Fig. 1. Logarithmic spirals were adopted as the guide curves

$$r_1 = r_{01} e^{w_1 \varphi_1} \quad \text{end} \quad r_2 = r_{02} e^{w_2 \varphi_2},$$

where  $r_1, r_2$  — the current radius vectors of the guide curves;  $r_{01}, r_{02}$  — the initial radius vectors of the guide curves (1), (2);  $w_1, w_2$  — tangents of angles between the current radius vector and the tangent;  $\varphi$  parameter, namely the polar angle of rotation of the radius of the vector. The coordinate is programmed in the radians of the polar angle  $\varphi_1$ .

Agro-technical assessment of the quality of work of plows with standard cultural and semi-screw shelves of buildings was carried out on the percentage of plowing of crop residues. Taking into account the working speed of the plows of  $2.7 \text{ m/s}$ , the percentage of plowing of crop residues for the plow with the half-screw shelves was 97.9%, and with the crop — 78.1%, which is higher on 19.8%. Experimental studies have shown the prospect of using semi-screw shelves on general-purpose shelf plows.

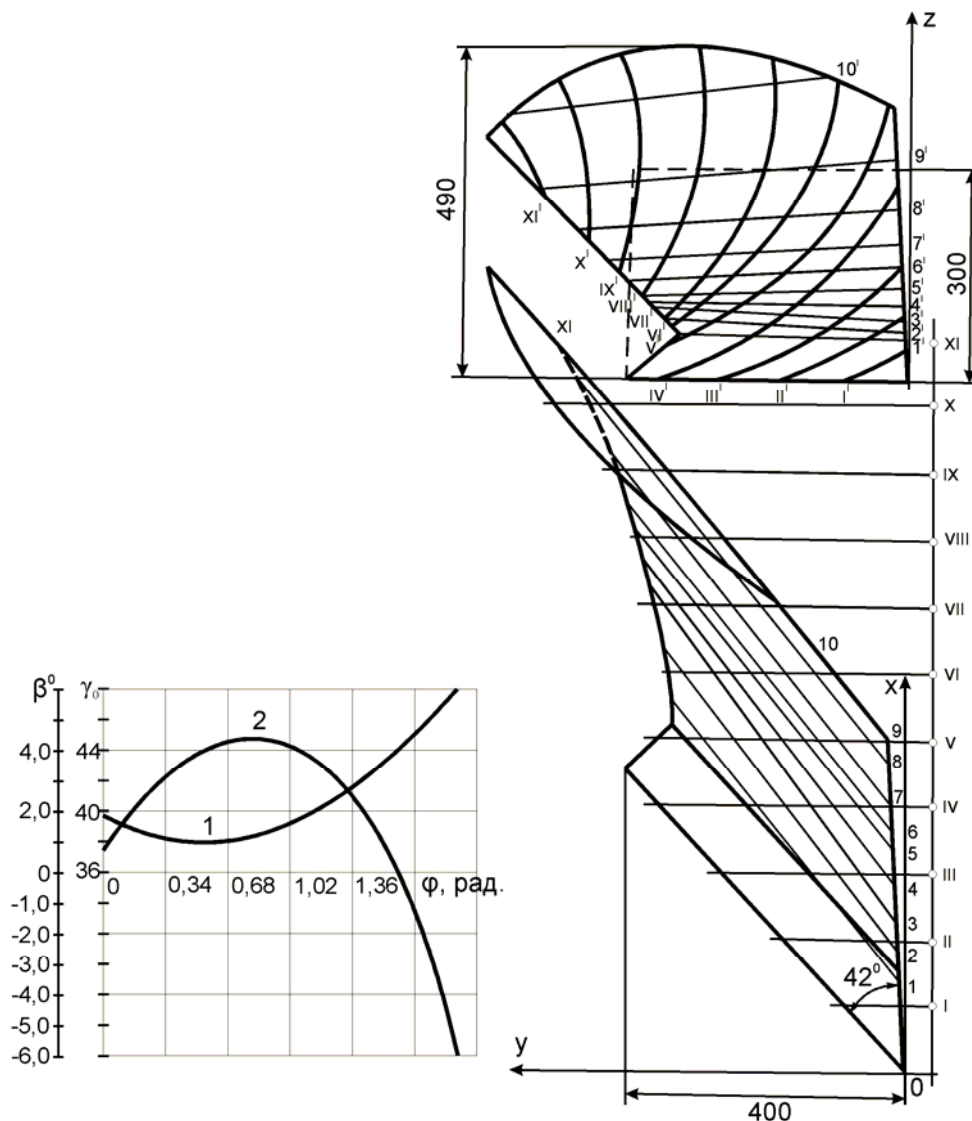


Fig. 1. The scheme of the surface of the plow body and the slope function of the projection of the genera: 1 — graph of the function  $a(\varphi)$ ; 2 — function graph  $b(\varphi)$

### Conclusions and prospects for further research

The model of the unfolding surface, which is incident to the two guide curves, has been successfully applied in the design of the working surface of a general-purpose plow. Experimental studies have shown the advantage of expandable surfaces as working shelves for general-purpose plows. Thus, the geometric surface model is promising and can be used in the design of other shelves working bodies. Further studies should aim to determine the surface curvature to be taken into account in computer design.

### References

- [1] Golovanov, N.N. (2002). *Geometricheskoe modelirovanie: nauchnoe . izdanie [Geometrical design: scientific publication]* Moscow: Publishing house of physical and mathematical literature [in Russia]
- [2] Kotov, I.I. (1975) *Metodicheskoe posobie po nachertatelnoy geometrii "Algoritmy konstruirovaniya karkasnykh poverkhnostey" [Methodical manual on descriptive geometry "Algorithms of constructing of framework surfaces"]*. Moscow: Publishing House Mosk. Aviation in-that [in Russia]

- [3] Kotov, I.I. (1973). *Nachertatel'naya geometriya. Kurs lektsiy dlya slushateley FPK [Descriptive geometry. A course of lectures for students of FPK]*. Moscow: Publishing House Mosk. Aviation in-that [in Russia]
- [4] Malyy, A. D., & Popudnyak Yu. Ya., & Ulchenko T. V., Starosolskaya T. V. (2014). Kvizilinye graficheskie modeli prostranstva [Quasilinear graphical space mode]. *Mosty ta tuneli: teoriya, doslidzhennya, praktika – Bridges and tunnels: theory, research, practice*, 5, 51–56 [in Ukraine]
- [5] Naydysh V.M. (1980). Konstruirovaniye poverkhnostey iz mnogoparametricheskikh mnozhestv liniy i poverkhnostey [Designing surfaces from multiparameter sets of lines and surfaces] *Nauchnye trudy Ukrainskoy selskokhozyaystvennoy akademii – Scientific works of the Ukrainian Agricultural Academy*, 234, 141–144 [in Ukraine]
- [6] Naydysh V.M. (1981)Konstruirovaniye poverkhnostey, prokhodyashchikh cherez ikh spetsialnye linii [Construction of surfaces passing through their special lines] *Izvestie vysshikh uchebnykh zavedeniy: aviatsionnaya tekhnika – Izvesestie of higher educational institutions: aviation engineering*, 2, 88–90 [in Russia]
- [7] Naydysh V.M. (1979) Razvertyvayushchiesya lineichatye poverhnosti zadannye liniei prostranstva parametrov [Expanding ruled surfaces defined by a parameter space line] *Prikladnaia geometriia i inzhenernaia grafika – Applied Geometry and Engineering Graphics*, 27, 89–90 [in Ukraine]
- [8] Tishchenko S.S. (2007) Geometricheskaya adaptatsiya poverkhnostey pochvoobrabatyvayushchikh rabochikh organov k vypolnyaemomu protsessu [Geometric adaptation of the surfaces of tillage workers to the process being performed] *Visnyk Kharkivskogo nacionalnogo tekhnichnogo universytety im p. vasylenka – Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка*, 59, 110–114 [in Ukraine]
- [9] Tishchenko S.S. (2005) Geometricheskaya model adaptivnoy poverkhnosti pochvoobrabatyvayushchego rabocheho organa intsidentnoy dvum krivym [Geometric model of the adaptive surface of a soil-cultivating working body incident to two curves] *Sbornik nauchnykh robot Krymskogo gosudarstvennogo universiteta – Collection of scientific works of the Crimean State University*, 84, 242–247 [in Ukraine]
- [10] Tishchenko S.S., & Karas V.V. (2006) Konstruirovaniye poverkhnosti okuchnika dlya propashnykh kultur po absolyutnym traektoriyam dvizheniya pochvy [Designing the surface of the hoop for row crops on absolute paths of soil movement] *Visnyk Dnipropetrovskogo derzhavnogo agrouniversytety – Bulletin Dnipropetrovsk sovereign agroneurs*, 1, 27–30 [in Ukraine]
- [11] Trukhina V.D. (1989) Primenenie vychislitelnoy tekhniki pri proektirovanii lemeshno-otvalnykh poverkhnostey [The use of computing in the design of plow-bottom surfaces]. Barnaul [in Russia].
- [12] Lawrence D. Brown. A semiparametric multivariate partially linear model: A difference approach / Lawrence D. Brown, Michael Levine, Lie Wang // *Journal of Statistical Planning and Inference*. – 2016. – Vol. 178. – P. 99–111. doi:10.1016/j.jspi.2016.06.005

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗГОРТНИХ ПОВЕРХОНЬ, ІНЦИДЕНТНИХ ДВОМ НАПРЯМНИМ КРИВИМ

Тищенко С.С.

### Реферат

Для забезпечення раціонального вибору параметрів поверхонь деталей при проектуванні технологічного обладнання потрібно базуватися на методах штучного інтелекту, зокрема на узагальнених алгоритмах. У статті розглянуто геометричну модель лінійчатої розгортної поверхні, та умови її поверхні. Надається узагальнений алгоритм побудови розгортної поверхні незалежно від типу робочого органу чи виробів машинобудування. Однією з найпоширеніших у галузі поверхонь є розгортні поверхні, які займають особливе положення, завдяки своїм дифе-

ренціально-параметричним властивостям: дотична площина торкається поверхні вздовж прямолінійної твірної і не змінює свого положення в просторі при зміні точки контакту. Такі поверхні можуть бути виготовлені згинанням листового металу. Ці положення дозволяють виготовити продукцію, заощаджуючи значні матеріальні та енергетичні засоби; тому розробка геометричних моделей таких поверхонь є важливим завданням. Наведена геометрична модель розгортної поверхні, напівгвинтового корпусу плугу загального призначення.

Експериментальні дослідження показали перспективність застосування напівгвинтових полиць плугах, особливо в двоярусній оранці. Враховуючи робочу швидкість руху плуга  $2,7 \text{ м/с}$ , відсоток залишків сільськогосподарських культур на оранці з напівгвинтовими полицями становить  $97,9\%$ , а з культурними корпусами плугів —  $78,1\%$ .

Розроблені підходи до вирішення проблеми розпізнавання умов існування розгортних поверхонь при застосуванні програми по її концептуальній моделі. Побудовано відповідні процедури обчислювальних алгоритмів. Математична модель, що визначає вплив параметрів поверхонь на їх експлуатаційні властивості – силу опору. Теоретичні основи цієї моделі можуть бути використані у середовищі програмування для будь-якого інтерфейсу. В даний час ця модель може дати значні результати, які відповідають сучасним вимогам будівельної інженерії. У процесі параметричної оптимізації модель генерує безліч бажаних значень параметрів поверхонь. Модель дозволяє зображення розгортних поверхонь за формальними ознаками. Результатом є спряження розгортних поверхонь до певної групи, кожна з яких відповідає безлічі окремих параметрів обчислювальної моделі.

### Література

1. Голованов Н. Н. Геометрическое моделирование : науч. изд. Москва : Изд-во физико-математической литературы, 2002. 472 с.
2. Котов И. И. Методическое пособие по начертательной геометрии "Алгоритмы конструирования каркасных поверхностей" . Москва : Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1975. 63 с.
3. Котов И. И. Начертательная геометрия. Курс лекций для слушателей ФПК. Москва : Изд. Моск. авиац. ин-та, 1973. 198 с.
4. Квазилинейные графические модели пространства / А. Д. Малый, О. Ю. Попудняк, Т. В. Ульченко, Т. В. Старосольська. *Мости та тунелі : теорія, дослідження, практика*. 2014. № 5. С. 51–56.
5. Найдыш В. М. Конструирование поверхностей из многопараметрических множеств линий и поверхностей . *Научные труды Украинской сельскохозяйственной академии*. 1980. № 234. С. 141–144.
6. Найдыш В. М. Конструирование поверхностей, проходящих через их специальные линии. *Известие высших учебных заведений: авиационная техника*. 1981. № 234. С. 88–90.
7. Найдыш В. М. И. Г. Балуба. Развертывающиеся линейчатые поверхности, заданные линией пространства параметров. *Прикладная геометрия и инженерная графика*. 1979. № 27. С. 89–90.
8. Тищенко С. С. Геометрическая адаптация поверхностей почвообрабатывающих рабочих органов к выполняемому процессу. *Вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. 2007. № 59. С. 110–114.
9. Тищенко С. С. Геометрическая модель адаптивной поверхности почвообрабатывающего рабочего органа инцидентной двум кривым. *Сборник научных работ Крымского государственного университета*. 2005. № 84. С. 242–247.
10. Тищенко С. С., В. В. Карась. Конструирование поверхности орудия для пропашных культур по абсолютным траекториям движения почвы. *Вісник Дніпропетровського державного агроуніверситету*. 2006. № 1. С. 27–30.
11. Трухина В. Д. Применение вычислительной техники при проектировании лемешно-отвальных поверхностей. Барнаул, 1989. 82 с.
12. Lawrence D. Brown. A semiparametric multivariate partially linear model: A difference approach / Lawrence D. Brown, Michael Levine, Lie Wang // *Journal of Statistical Planning and Inference*. - 2016. - Vol. 178. - P. 99–111. doi:10.1016/j.jspi.2016.06.005

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185041

UDC 004.02

**I.A. Karpov**, postgraduate, karpovilya5@gmail.com

**S.V. Antonenko**, candidate of engineering sciences, associate professor, szemlyanaya@gmail.com  
Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro

## USAGE OF MULTI-AGENT SYSTEM TO SOLVETEXT PROCESSING PROBLEM

*In this article an approach to the analysis of the text and obtaining information is proposed. A model of a multi-agent system was proposed, which allows you to process text documents and perform semantic text processing. A model for describing the process of extracting information using a text coverage system is proposed.*

**Keywords:** *Multiagent systems; deep learning; intellectual text mining; processing large text data arrays.*

*У даній роботі запропоновано підхід до аналізу тексту та отримання інформації з нього, використовуючи знання про моделі лексичної мови. Запропонована модель мультиагентної системи, що дає можливість паралельно обробляти текстові документи та виконує семантичну обробку тексту. Запропоновано модель опису процесу видобутку інформації за допомогою системи покриття тексту.*

**Ключові слова:** *Мультиагентні системи; глибинне навчання; інтелектуальний аналіз тексту; обробка великих масивів текстових даних.*

### Problem's Formulation

The development of parallelization methods for word processing is becoming increasingly important due to the increase in the volume of text data, including on Internet sites. A long stage of text processing is its conceptual or semantic analysis, and it is for this stage that it makes sense first of all to use the means of intelligent multi-threaded optimization.

One of the means for organizing the process of parallel data processing is multi-agent systems. They are used, among other things, for processing natural language texts and extracting information from the Internet.

A multi-agent system assumes a community of autonomously acting agents. However, in the overwhelming majority of works on this topic, agents are entities that rather direct data flows using standard algorithmic modules for their processing than directly implement their processing. Thus, the Multi-agent approach is applied to the organization of the word processing process as a whole, but does not directly affect the semantic analysis, it is nevertheless implemented sequentially, and, therefore, a significant performance gain cannot be achieved.

### Analysis of recent research and publications

Decision-making issues have been dealt with by many domestic and foreign scientists from different countries and universities. A big amount of different multi-agent systems for analysing text documents already exist.

The most significant advantage of using a multiagent system is the ability to simultaneously process a text document, and this system can also help to remove repetitions from the text. The downside is that during the process, the algorithm generates multiple agent conversations, as well as breaking existing connections and establishing new ones. This behavior of the model requires a considerable amount of computing resources. The model receives a text document. The result of the model is the object coverage of the text. The set of information objects received is subsequently refined and a resulting set of objects is formed that describes the content of the document in terms of the ontology of the subject area. All the knowledge used in this approach is, to one degree or another, based on a domain model that captures the concepts and relationships of interest to the user of the system in the form of an ontology. Thus, the ontology determines what kind of information should be extracted from the available data sources. The results of each stage of processing are projected onto

text, which allows to interpret the obtained results clearly and to distinguish fragments that are contextually related to each element of the received information.

#### **Formulation of the study purpose**

The approach to the deep text analysis and mining information on the basis of knowledge about the model of lexical language is proposed. A model for describing the process of extracting information using a system of text processing is proposed. This model enables parallel processing of text documents. With this system, we can improve the process that analysis a text document as a whole, and it does execute semantic analysis as well.

#### **Presenting main material**

The most important reason for using multi-agent systems in the design of an information system is that some domain domains require this. In particular, if there are different people or organizations with different (possibly conflicting) goals and their own information, then for their interaction a multi-agent system is needed. Even if each organization wants to model its internal affairs using a single system, organizations will not be given the authority of one separate person to build a system that represents them all: different organizations will need their own systems that reflect their capabilities and priorities [1].

The knowledge model in this article is considered in two aspects. Firstly, the data / information model used in the process of generating knowledge from text sources. The results of each processing stage are projected onto the text, allows you to visually interpret the results and highlight fragments that are contextually associated with each element of the information received

Secondly, a model of knowledge about the context within which text processing is carried out. Such knowledge includes dictionaries of subject vocabulary, models of facts describing the ways of expressing information accepted in a given field of knowledge, as well as knowledge of the types and genres of considered text sources and subject knowledge that already exists in the database, for example, obtained earlier in time processing other sources.

All the knowledge that is used in this approach, to one degree or another, is based on the domain model, which captures the concepts and relationships that interest the system user in the form of an ontology. Thus, the ontology determines which information should be extracted from available data sources.

A feature of the approach, it is considered that the use of knowledge in accordance with the subject area and the predominant use of lexical and semantic information to extract information from text does not exclude the use of partial parsing and syntactic restrictions that are imposed on the semantic framework of conceptual factual schemes.

Semantics-syntactic models. One way to describe the syntax of a language is an approach based on so-called control models. The essence of this approach is to establish certain rules that correspond to the lexeme or group of the same type of lexemes, which describes the necessary selective attributes of related words (valencies).

The semantic-syntactic model limits the syntactic compatibility and consistency of grammatical and semantic features of terms (vertices of syntactic groups) in accordance with the rules of coordination and management. Such models are described in the form of an actant structure associated with one or more generalized tokens [2]. A generalized lexeme means either the term of the dictionary (or its form), or a group of lexemes described in terms of grammatical and semantic categories without indicating a normal form. An actant structure describes a set of actants that characterize the corresponding valency, in terms of semantic and grammatical characteristics, which are limitations on dependent words.

Formally, the semantic-syntactic model, which is determined by the  $V$  dictionary, is characterized by a pair  $SS = \langle lg, A \rangle$ , where  $lg = L_V, S_V, M_V$  is generalized token characterizing a group of vocabulary terms  $L_V \subseteq V$  possessing a set of semantic attributes  $S_V$  and morphological attributes  $M_V$ ;  $A = \langle a_1, \dots, a_n \rangle$  is a sequence of actants describing the model, where each actant  $a_i = \langle S_i, M_i \rangle$ , of representations by a set of alternative semantic attributes  $S_i$ , and for each trait  $s_{ij} \in S_i$  a set of morphological restrictions is set  $m_{ij} \subseteq M_i$ .



The given structure of semantic-syntactic models provides ample opportunities for modeling language relationships in the text. So, the model may not contain syntactic restrictions and represent ontological relations, or be described without semantic characteristics and correspond to purely syntactic control models. The generalization of lexemes in models allows one to compactly define several language constructions, variants of the relationship of words in expressions and dictionary groups.

Models of facts. The fact model generates knowledge about the coordination of existing linguistic knowledge with subject knowledge. In a simplified form, without a semantic-syntactic component, this model was proposed in [3]. The fact model is defined by a structure similar to the *SS* actant structure. It is described either in terms of ontology classes, or in terms of semantic features of a dictionary and is associated with a fragment of ontology. Additionally, restrictions are placed on ontological features of structural elements and their relative position in the text.

Text model. In the process of processing the text of his presentation is gradually changing, enriching at each stage with new knowledge. According to the results of the inspection of works [1-5], to describe the change in the sequences of representations, we offer the concept of text coverings, when each cover is represented by a set of elements of the same type with given text positions (intervals). The following types of coatings are distinguished:

1. Grafematic coverage - is a breakdown of the text into elementary components, such as a word, punctuation mark, paragraph, number and the like.
2. The terminological cover consists of the vocabulary terms found in this text, taking into account possible homonymy and relationships of verbose terms.
3. segment coverage reflects the structural division of the text into logical (paragraph, sentence, title, etc.) and genre fragments.
4. The thematic coverage defines the textual boundaries of thematically related text areas for each subject under consideration.
5. Object coverage describes the information found in the form of a semantic network of domain objects.

Thus, the text model is determined by the combination of coverages  $\langle G, L_C, S_C, T_C \rangle$ , where  $G$  is graphematical coverage, determines the text position of the model elements;

$L_C$  is terminological coverage, ordered by text position sequence of lexical objects form  $l = \langle v, m_v, s_v, pos \rangle$ , where

$v \in V$  is thesaurus term;

$m_v$  is many morphological characteristics of the term  $v$ ;

$s_v$  is many semantic attributes of the  $v$ ;

$pos$  is text position of the  $v$  [5];

$S_C$  is segment coverage, including a hierarchically ordered set of the form segments  $s = \langle t_s, pos, R_s \rangle$ , where each segment is determined by the type  $t_s$ , the text positions  $pos$  and the relationships of  $R_s$  with other segments determine their relative position in the text;

$T_C$  is thematic coverage;

$I_C$  is object coverage, defines many ontological objects and indicates text fragments in which their descriptions were found.

The graphematical coverage of the text is the result of graphematical analysis, in which the input linear text is divided into elementary atoms. The main task of this stage is to group symbols of the same type in a sequence and give them the necessary interpretation: a word of a certain alphabet, number, symbol. For counters that work with markup (for example, html-texts), you can optionally set the typification of tags or labels. An important property of this stage is that the coating elements specify all possible limits of the elements for all subsequent representations, that is, during further processing, no atom can be "divided" [4, 5].

The terminological cover of the text is a lexical model of the text, which is based on the lexical model of the sublanguage, and includes the terms found in the text with reference to the position in the text. After the term is found in the text (more precisely, in the graphematical cover), a

lexical object is formed, which is provided by a set of attributes specified in the thesaurus for the found term [4, 5].

Segment coverage is the result of text segmentation and one way to display the formal structure of the text. In this approach, segmentation is considered at the macro level, that is, at the level of the entire text (as opposed to local sentence analysis) and the allocation of a set of interconnected fragments (clauses) that are considered in the framework of sentence parsing) and is based both on formal-textual and on genre features of the document [4, 5], which are transmitted by dividing the text into conceptual parts. When analyzing text, dividing into genre fragments helps narrow the scope of the search for information of a certain type and, thereby, improve the quality of analysis. The problems of determining the genre relevance of documents obtained from unknown sources, for example, when searching the Internet, are also being solved.

The thematic coverage defines many areas or text fragments that cover a set of specific topics. The formation of such areas is carried out on the basis of a dictionary in which a correspondence between terms and thematic features is specified. Thematic coverage is built on terminological coverage. We define a topic cover element or topic layer as a piece of text that includes a cluster of terms related to a single topic within the formal segment (or sequence of segments) of the segment coverage. Similar to segments, thematic layers can narrow the search area for information of a certain kind. However, as a rule, this type of coverage is used in problems of thematic clustering and text classification, and therefore is beyond the scope of this paper.

Multi-agent system model. After analyzing the existing models of multi-agent systems, a new model was created that, unlike others, can process text documents and perform semantic text processing. The created model receives a text document. The result of the model is an object coverage of the text. The set of obtained information objects is refined and the resulting set of objects is formed, describes the content of the document in terms of the ontology of the subject area.

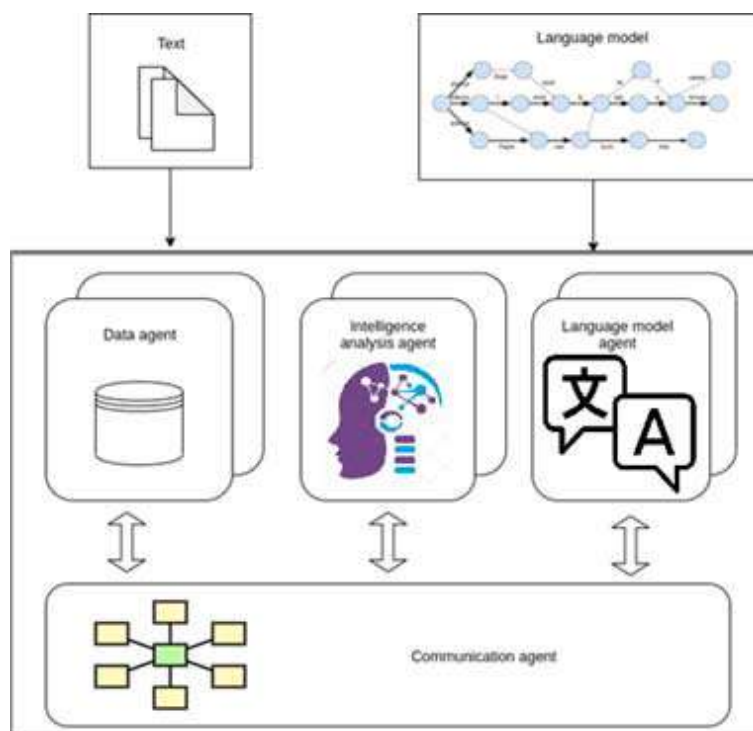


Fig. 1. Multi-Agent System Model

This system consists of four types agents:

1. Data agent. The agent receives a document and extracts textual information, provides a unification of heterogeneous data coming from various sources (for example, from a database).

Performs preliminary data processing and finds the appropriate relationships. The result of the agent is linear text with basic formatting and metadata.

2. Mining agent. The agent receives a pre-processed document and performs an analysis of contextual information. Each context object is generated based on the language model. According to the received data, they can generate new data agents, as well as reveal the value of their attributes.

3. Agent communicator. In the communication process, agents agree on the correspondence of the language model and the corresponding ontology tokens. Also, on the basis of finding new tokens, the agent generates new agents of the language model for replenishing the ontology. The work of the agent-communicator also consists in a sequential analysis of the work of other agents. If all agents except him are inactive, he ends the operation of this algorithm.

4. Agent language model. The agent analyzes each individual token, that is, establishes a correspondence between the classes of a given ontology and text units. Has the ability to replenish his vocabulary, expanding ontology.

Agents interact using two types of messages:

1. Information about new data is transmitted using the communicator agent and is performed between the data agent and the data mining agent. The purpose of such a request is to obtain information about certain attributes and the relationship between them for each individual document.

2. Token message. These messages are exchanged between the data mining agent and the language model agent using the communicator agent. This query is performed to replenish the language model and analyze each individual word.

A description of the agents protocols, ways of understanding each other, and methods for communication are presented in [5]. All agents can work in parallel until they go into a wait state. The stopping moment is determined by the communicator agent. The biggest advantage of using a multi-agent system is the possibility of a text document parallel processing, and this system can also help with the removal of repetitions in the text. The disadvantage may be that in the process, the algorithm generates numerous negotiations of agents, as well as breaking existing relationships and establishing new ones. Such model behavior may require additional computing resources.

### Conclusions

The algorithm presented in this paper allows parallel processing of text documents and semantic processing of text using the process of extracting information using a text coverage system and knowledge for lexical language models.

### References

- [1] Aref, M.M. A Multi-Agent System for Natural Language Understanding. – International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, 2003, 36.
- [2] C.T. dos Santos, P. Quaresma, I. Rodrigues, R. Vieira A Multi-Agent Approach to Question Answering // In Computational Processing of the Portuguese Language: 7th International Workshop, PROPOR 2006. Itatiaia, Brazil, May 2006 (PROPOR'2006) LNAI 3960, 13-17 de Maio de 2006, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, pp. 131-139.
- [3] Cheng X., Xie Y., Yang T. Study of Multi-Agent Information Retrieval Model in Semantic Web // In Proc. of the 2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing (ETTANDGRS'08), 2008, Vol. 02, P. 636-639.
- [4] Yakovchuk E.I., Sidorova E.A. Generalized semantic-syntactic models in text processing tasks // Proceedings of the workshop “High-tech software NGO-2011”. Ershov conference on computer science. –Novosibirsk: ISI SB RAS, 2011. –P.287-292.
- [5] Michael Wooldridge. An Introduction to MultiAgent Systems. – University of Liverpool: Wiley, 2009.

## ВИКОРИСТАННЯ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОБРОБКИ ТЕКСТУ

Карпов І.А., Антоненко С.В.

### Реферат

У даній роботі запропоновано підхід до аналізу тексту та отримання інформації з нього, використовуючи знання про моделі лексичної мови. Була запропонована модель мультиагентної системи, що дає можливість паралельно обробляти текстові документи та виконує семантичну обробку тексту. Запропоновано модель опису процесу видобутку інформації за допомогою системи покриття тексту.

Були розглянуті способи організації мультиагентної системи з використанням різних моделей опису даних та структур семантико-синтаксичних моделей, які надають широкі можливості моделювання мовних зв'язків у тексті. Також були розглянуті різні покриття тексту. Після аналізу існуючих моделей мультиагентних систем була створена нова модель, яка, на відмінну від інших, може обробляти текстові документи та виконувати семантичну обробку тексту. Створена модель отримує текстовий документ. Результатом роботи моделі є об'єктне покриття тексту. Множина одержаних інформаційних об'єктів згодом уточнюється та формується результуюча множина об'єктів, що описує контент документа в термінах онтології предметної області. Дана система складається з агентів чотирьох видів:

1. Агент даних. Агент отримує документ та витягує текстову інформацію, забезпечує уніфікацію різнорідних даних, які надходять з різних джерел (наприклад, з бази даних).

2. Агент інтелектуального аналізу. Агент отримує попередньо оброблений документ та виконує аналіз контекстної інформації.

3. Агент-комунікатор. У процесі комунікації агенти домовляються про відповідність токенів мовної моделі та відповідної їй онтології.

4. Агент мовної моделі. Агент виконує аналіз кожного окремого токена, тобто, встановлює відповідність між класами заданої онтології та текстовими одиницями.

Агенти взаємодіють за допомогою повідомлень двох видів:

1. Передача інформації про нові дані відбувається за допомогою агенту-комунікатора та виконується між агентом даних та агентом інтелектуального аналізу.

2. Повідомлення токена. Такими повідомленнями обмінюється агент інтелектуального аналізу даних та агент мовної моделі за допомогою агенту-комунікатора.

Алгоритм, що наведений у даній роботі, надає можливість паралельно обробляти текстові документи та виконувати семантичну обробку тексту, використовуючи процес видобутку інформації за допомогою системи покриття тексту та знання про моделі лексичної мови.

### Література

1. Aref, M.M. A Multi-Agent System for Natural Language Understanding. – International Conference on Integration of Knowledge Intensive Multi-Agent Systems, 2003, 36.
2. C.T. dos Santos, P. Quresma, I. Rodrigues, R. Vieira A Multi-Agent Approach to Question Answering // In Computational Processing of the Portuguese Language: 7th International Workshop, PROPOR 2006. Itatiaia, Brazil, May 2006 (PROPOR'2006) LNAI 3960, 13–17 de Maio de 2006, Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, pp. 131–139.
3. Cheng X., Xie Y., Yang T. Study of Multi-Agent Information Retrieval Model in Semantic Web // In Proc. of the 2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing (ETTANDGRS'08), 2008, Vol. 02, P. 636–639.
4. Yakovchuk E.I., Sidorova E.A. Generalized semantic-syntactic models in text processing tasks // Proceedings of the workshop “High-tech software NGO-2011”. Ershov conference on computer science. –Novosibirsk: ISI SB RAS, 2011. – P. 287–292.
5. Michael Wooldridge. An Introduction to MultiAgent Systems. – University of Liverpool: Wiley, 2009.

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ В ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185045

UDC 621.865.8

A.D. Romaniuk, Cand. Tech. Sci., Dozent, oleksandrromaniuk5@gmail.com

Dnieper State Technical University, Kamianske

## DEVELOPMENT OF ROTARY UNITS MECHANICAL TRANSMISSION MATHEMATICAL MODEL

*In this paper a mathematical model of the assembly unit of the mechanical transmission rotation node is developed. On its base the dependences for calculating the mass of the rotational element of the model of the bearing shaft were obtained. The introduced general coefficients of constructive conversion of geometric parameters make it possible to estimate the mass of the rotating element in the first approximation at the stage of preliminary designing to stabilize the kinematic and dynamic characteristics of the machine aggregate without the use of additional masses.*

**Keywords:** mechanical transmission; mass; shaft; rotary knot; designing.

*В даній роботі розроблена математична модель складальної одиниці вузла обертання механічної передачі на основі якої отримано залежності для розрахунку маси обертального елемента моделі валу з підшипниками. Введені загальні коефіцієнти конструктивного перерахунку геометричних параметрів дають можливість оцінити масу обертального елемента в першому наближенні на етапі попереднього проектування з метою стабілізації кінематичних та динамічних характеристик машинного агрегату без використання додаткових мас.*

**Ключові слова:** механічна передача; маса; вал; обертальний вузол; проектування.

### Problem's Formulation

During designing the actuator of the machine unit, standard mechanical gears are used, among which the most common gearboxes. The main elements of such components are the nodes that carry out rotational motion. The weight of such assemblies is more than two thirds of the weight of the gearbox. Therefore, given that in steady-state motion the kinematic and power characteristics of the rotating units of the mechanism are periodic functions due to the amplitude oscillations of the transfer function, there is a need to reduce the amplitude of oscillations of the link speed. On this basis, the problem of optimizing the kinematic and power characteristics of the actuator of the machine unit is solved in various ways. The most common is the use of additional masses [1,2,3,4]. The use of a flywheel makes it possible to significantly reduce the amplitude of oscillations of the speed of the link, as it causes an increase in the reduced moment of inertia of the mechanism. The disadvantage of installing the flywheel is the extra mass, which increases the weight of the mechanism and its inertia. To avoid matching disadvantages of additional masses in the process of preliminary design of the actuator of the machine unit must be selected such a standard reducer, the maximum torque of the nodes which would correspond to the additional mass. But in practice it is almost impossible to find the right gearbox. It is more expedient to design new gearing moments of inertia of rotating masses which could serve as a flywheel.

### Analysis of recent research and publications

The basic principles and approaches of designing the transmission mechanisms based on the optimization of their kinematic and force characteristics were considered in [5,6,7,8], in which the main aspect is directed to the analysis of the common elements of the drive circuit without taking into account the masses of rotating units of the drive of the executive body of the machine.

In solving this problem, it is necessary to find at the stage of preliminary design the appropriate mass of the rotary node of the mechanical transmission, which would correspond to the flywheel flywheel's moment. Given the fact that the torque of the rotating mass located on the high-speed transmission shaft is smaller than the mass on the slow-moving shaft, the task can be solved by using the rotational mass of the high-speed stage as a flywheel, which ultimately significantly reduces the overall weight of the machine. The corresponding kind of problem was solved in [9,10,11], but only considering the optimal mass of gears. These works did not consider the mass of the shaft and its mounting nodes, which is also characterized by a significant flywheel.

The tasks of designing mechanical gears, considering the optimization of the kinematic and power characteristics of the actuator of the machine unit are many criteria [9,10,11]. This is because there is a need to consider mutually dependent parameters. Especially the problem is complicated when developing a mathematical model of the elements of the assembly node of the mechanical transmission.

### Formulation of the study purpose

Based on the interaction conditions between the details of the assembly unit of the mechanical transmission rotation unit (Fig. 1), which are expressed by the coupling equations describing the conditions of the transmission operation, in designing these equations form a system with a corresponding number of unknowns.

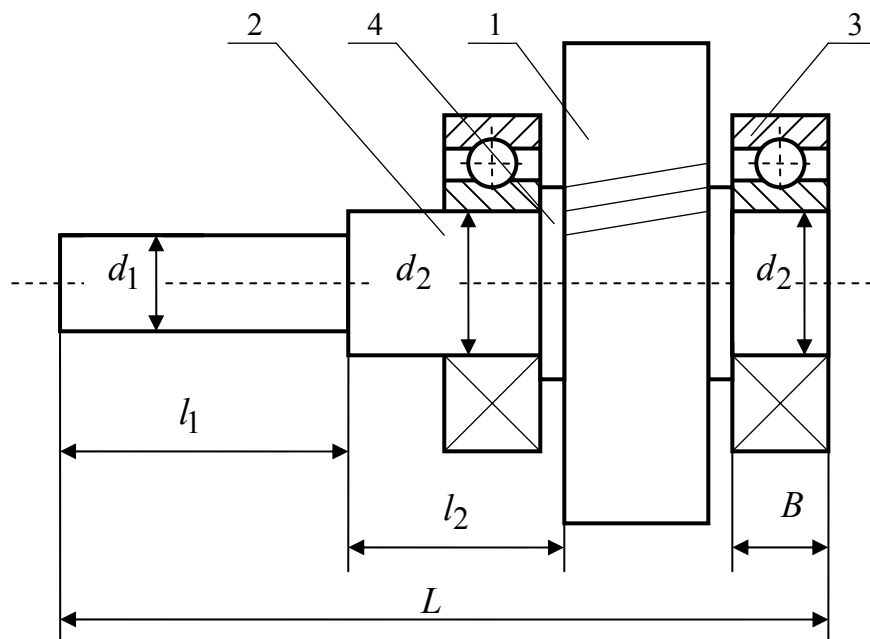


Fig. 1. Mechanical gear assembly unit: 1 — gear, 2 — shaft, 3 — shaft bearings (rolling bearings), 4 spacer sleeve

The peculiarity of designing the assembly unit of the mechanical transmission rotation unit under the condition of its optimization is that the number of unknown design values is much greater than the coupling equations, which significantly complicates the already multivariate task. Therefore, the problem of reducing the number of unknowns, using other considerations, is considered, or to allow their change within some limits, as well as to determine the influence of the relevant parameters on the nature of change in the mass of the assembly unit of the mechanical transmission rotation unit

during the design process. In this regard, it is advisable to consider the problem of optimizing the mass of individual parts of the assembly unit, as well as the introduction of restrictions on the parameters of this part. These include: functional constraints on optimization parameters; parametric restrictions; discrete restrictions. In [9, 10, 11], the problem of optimizing the mass of a gear wheel of a mechanical transmission (position 1, Fig. 1) was considered, depending on the six basic design variables.

In this case, consider the shaft of the mechanical transmission (position 2, Fig. 1), the construction of which is the most common in practice. We choose that the mass of the mechanical transmission shaft will depend on eight major unknown design variables:

1. ( $x_1 = d_1$ ) — diameter of the output section of the shaft;
2. ( $x_2 = d_2$ ) — the diameter of the shaft section under the bearing;
3. ( $x_3 = l_1$ ) — length of the output section of the shaft;
4. ( $x_4 = l_2$ ) — length of the shaft section from the side of the output part;
5. ( $x_5 = B$ ) — length of shaft section under bearing;
6. ( $x_6 = \rho$ ) — specific gravity of the shaft material;
7. ( $x_7 = [\tau]$ ) — the permissible value of the tangent pressures during torsion;
8. ( $x_8 = T$ ) — value of torque on the shaft.

Choosing the best solution or comparing the solutions will be done by some function, which is determined by the design parameters and is called the target. In the process of solving the optimization problem, the values of the parameters at which the objective function has an extremum must be found. The objective function plays the role of the basic criterion of optimality in mathematical models by which engineering problems are described.

In this case, the objective function can be written as

$$m_i = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8).$$

We establish the possibility of reducing the number of variables, as well as the nature of the influence of the corresponding parameters on the mass of the shaft during its optimization.

We define the dependency and select the following constraints for the design variables.

1. The diameter of the output section of the shaft when designing is calculated from the condition of the strength of the permissible tangent pressures in the condition of pure torsion

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{T}{0,2[\tau]}}$$

The final diameter is selected according to the standard row (*Ra10, Ra20, Ra40*).

2. The diameter of the shaft section under the bearing is determined based on design standards

$$d_2 = d_1 + [2c + (3...5)],$$

where  $c$  — is the tilt radius of the transitional section of the shaft.

The final diameter is selected according to the standard row (*Ra10, Ra20, Ra40*).

3. The length of the output section of the shaft is determined based on design standards

$$l_1 = (1,8...2,5) \times d_1.$$

The residual length is selected according to the standard row (*Ra10, Ra20, Ra40*), considering the length of the keyway, which is set on this section.

4. The length of the shaft section from the side of the starting part shall be calculated considering the geometric dimensions of the respective parts and assemblies which are directly mounted on that section

$$l_2 = B + t + H + \Delta,$$

where:  $B$  — the width of the bearing,  $t$  — the width of the spacer sleeve,  $H$  — the height of the through bearing cap,  $\Delta$  — the structural (safety) clearance.

The residual length is selected according to the standard row (*Ra10, Ra20, Ra40*).

5. The length of the shaft section under the bearing is determined according to the width of the selected bearing:

- for ball bearings  $B$  ;
- for roller bearings  $T$  .

In this case, we consider only ball bearings.

6. The weight of the shaft material in this case can be considered as a constant value, since the shafts are made of one material. For steel 40, 45, 40X, 40XH, of which shafts are mainly made, the specific gravity is  $\rho = 7820 \text{ кг/м}^3$ .

7. The permissible magnitude of the tangential stresses for torsion for steels of which mainly produce shafts in the first approximation can be considered as a constant value, since

$$[\tau] = 20 \dots 40 \text{ МПа.}$$

8. The magnitude of the torque on the shaft is constant if the speed of transmission and engine power are constant

$$T = \frac{N}{\omega},$$

where:  $N$  — power on the shaft;  $\omega$  — angular speed of the shaft.

#### Presenting of main material

Consider the mathematical model of the shaft (Fig. 2), which is an element of the assembly unit of the rotation node of the mechanical transmission (Fig. 1). The problem of determining the mass of the gear wheel to optimize it was considered in [9,10,11], so to determine the mass of the shaft assembly must determine the mass of the shaft diameter and the mass of the inner rings of the bearing, which are installed on the press fit on the shaft.

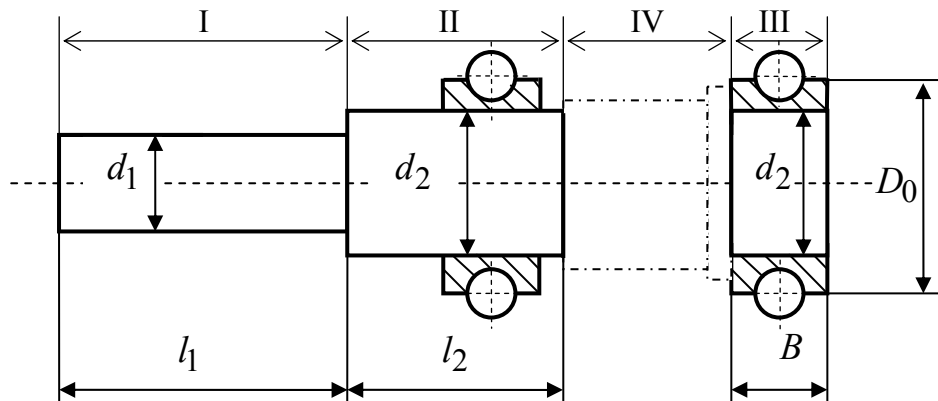


Fig. 2. Mathematical model of a shaft with bearings

The need to extend the mathematical model presented in [9] is due to the fact that the rotational mass of the mechanical transmission in the drive circuit consists not only of the mass of the gear wheel, but also the mass of the shaft and the bearings. The corresponding mass, which was not taken into account in [9], in gearboxes that transmit significant torques can almost equal the mass of the gear wheel. Thus, the extension of the mathematical model to establish the optimal mass of the assembly unit in order to stabilize the kinematic and dynamic characteristics of the machine unit is relevant.

According to the developed mathematical model of a shaft with bearings, we have three main sections that are characterized by the appropriate diameter and length.

The previously defined dependencies and corresponding limitations for design variables to simplify mathematical calculations will be written in the following form, introducing the concept of the coefficient of structural calculation of the geometrical parameters of the shaft  $k$  :

- $(x_1 = d_1), \quad d_1;$
- $(x_2 = d_2), \quad d_2 = kd_1;$
- $(x_3 = l_1), \quad l_1 = k_1d_1;$
- $(x_4 = l_2), \quad l_2 = k_2d_2;$



- $(x_5 = B)$ ,  $B = k_3 d_2$ ;
- $(x_6 = \rho)$ ,  $\rho = \text{cons}$ ;
- $(x_7 = [\tau])$ ,  $[\tau] = \text{cons}$ ;
- $(x_8 = T)$ ,  $T = \text{cons}$ .

In the given dependencies:  $k$  — coefficients of constructive conversion of diameter of the corresponding degree of a shaft, and  $k_i$  — coefficients of constructive conversion of the corresponding length of a section of a shaft.

Based on the above analysis of the parameters of the shaft of the mechanical transmission, the target function can be written in the form

$$m = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5).$$

Based on the mathematical model, we obtain the equation to determine the mass of the shaft as the sum of the masses of the respective sections,

$$m_b = \sum_{i=1}^3 m_i = m_I + m_{II} + m_{III}.$$

The mass of  $i$  - section of the shaft is determined by the dependence

$$m_i = V_i \times \rho,$$

where:  $V_i$  — volume of  $i$  - section of the shaft;  $i$  — section's number.

Given that the shaft is made solid, the volume of this section of the shaft will be determined by the equation of volume of the cylinder

$$V_i = S_i \times l_i = \frac{1}{4} \pi \times d_i^2 \times l_i.$$

Since, according to the coefficient of constructive conversion of geometrical parameters of the shaft, the length of the  $i$ -th section of the shaft is written in the form

$$l_i = k_i \times d_i.$$

Thus, in general, the volume of  $i$  - section of the shaft will be determined by the following equation

$$V_i = \frac{1}{4} \pi \times d_i^2 \times k_i \times d_i = \frac{\pi}{4} k_i \times d_i^3,$$

and the volume of the shaft as a whole

$$V = \frac{\pi}{4} [k_1 d_1^3 + k_2 d_2^3 + k_3 d_3^3] = \frac{\pi}{4} [k_1 d_1^3 + k^3 (k_2 + k_3) d_1^3].$$

Given the above equations, we obtain the dependence for determining the mass of the shaft

$$m_b = \frac{\pi}{4} \rho [k_1 + k^3 (k_2 + k_3)] d_1^3 = \frac{\pi}{4} \rho \times K_b \times d_1^3,$$

where  $K_b = k_1 + k^3 (k_2 + k_3)$  is the total coefficient of structural recalculation of the geometrical parameters of the shaft.

So

$$m_b = \frac{\pi}{4} \rho \times K_b \times d_1^3.$$

The analysis of the obtained equation indicates that the mass of the shaft in the first approximation can be estimated at the preliminary design stage, since only the initial diameter of the shaft is known from the design calculation. The difficulty of estimation is to determine the overall coefficient of constructive recalculation of the geometrical parameters of the shaft. To simplify the calculations, it is advisable to have tabular or graphical characteristics of the coefficient  $K$ , depending on the output shaft diameter.

According to the mathematical model of the shaft with bearings, determine the mass of the inner ring of the bearing

$$m_n = V_n \times \rho,$$

where the volume of the inner bearing ring is given by equation

$$V_n = \frac{1}{4} \pi \times D_0^2 \times B - \frac{1}{4} \pi \times d_2^2 \times B.$$

Taking into account the coefficient of structural recalculation of the geometrical parameters of the shaft, and also taking  $D_0 = k_4 d_2$ , we obtain the dependence for determining the mass of the bearing ring

$$m_n = \frac{\pi}{4} \rho (D_0^2 - d_2^2) B = \frac{\pi}{4} \rho \times K_n \times d_1^3,$$

where  $K_n = k^3 (k_4^2 - k_3)$ .

So

$$m_n = \frac{\pi}{4} \rho \times K_n \times d_1^3.$$

The total mass of the rotating element of the mathematical model of the shaft with bearings is determined by the following equation

$$m = \sum_{i=1}^2 m_i = m_b + m_n = \frac{\pi}{4} \rho \times K_b \times d_1^3 + \frac{\pi}{4} \rho \times K_n \times d_1^3 = \frac{\pi}{4} \rho \times K \times d_1^3,$$

where  $K = K_b + K_n$ , the total coefficient of structural recalculation of the geometric parameters of the rotating element of the model of the shaft with bearings. The number of bearings on the shaft must be taken into account. In this case, there are two of them, therefore  $K_n = 2k^3 (k_4^2 - k_3)$ .

Total dependency,

$$m = \frac{\pi}{4} \rho \times K \times d_1^3,$$

indicates that the mass of the rotating element of the model shaft with bearings in the first approximation can be estimated at the preliminary design stage, since the design calculation is known only the output diameter of the shaft. The complexity of the assessment is to determine the coefficient  $K$ , the value of which depends on the regulatory requirements and the relevant standards used in the design process of the assembly units of mechanical transmissions. Further studies will be directed to determine the nature of the  $K (K_b, K_n)$  coefficient change depending on the output shaft diameter or other design parameters.

### Conclusions

1. A mathematical model of the assembly unit of the mechanical transmission assembly unit was developed, on the basis of which dependencies were obtained for calculating the mass of a rotating element of a model of a shaft with bearings.

2. The introduction of the coefficient of structural recalculation of the geometrical parameters of the shaft and the overall coefficient of the structural recalculation of the geometric parameters of the rotating element of the model shaft with bearings make it possible to estimate the mass of the shaft or the mass of the rotating element in the first approximated at the stage of preliminary design, as from the design in order to stabilize the kinematic and dynamic characteristics of the machine unit without the use of additional masses.

3. The dependence of the mass of the rotating element of the shaft model with the bearings on the normative requirements and corresponding standards used in the design of the assembly units of mechanical gears has been established.

### References

- [1] Gemintern V.N., & Kogan B.M. (1980) *Metody optimal'nogo proektirovaniya. [Methods of optimal design]*. Moscow: Energiia [In Russian].

- [2] Sobol I.M., & Statnikov R.B. (2006) *Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi kriterijami [Choosing the optimal parameters in problems with many criteria]*. Moscow: Drofa [In Russian].
- [3] J. Genta. (1988) *Nakopiteli kineticheskoy energii. Teorija i praktika sovremennyh mahovichnyh system [Aggregators kinetic energy here. Theory and practice of advanced flywheel systems]* Moscow: Mir [In Russian].
- [4] Romaniuk A.D. (2010) Metod mnogokriterialnoy optimizatsii parametrov zubchatyih mehanizmov [Method of multicriteria optimization of gears parameters]. *Sbornik nauchnyh trudov Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta "Mehanizacija proizvodstvennyh processov rybnogo hozjajstva, promyshlennyh i agrarnykh predpriyatij. Mehanika tverdogo tela."* – Collection of scientific works of the Kerch State Maritime Technological University "Mechanization of production processes in the fishing industry, industrial and agrarian enterprises. Mechanics of a solid body ", Issue 11, 81–85. [In Russian].
- [5] Romaniuk A.D. (2012) Opredelenie minimalnogo vremeni razgona mashinnogo agregata [Determination of the minimum time for the acceleration of the machine assembly] *Sbornik nauchnyh trudov Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta i Dneprodzerzhinskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta "Mehanizacija proizvodstvennyh processov rybnogo hozjajstva, promyshlennyh i agrarnykh predpriyatij. Mehanika tverdogo tela."* – Collection of scientific works of Kerch State Maritime Technological University and Dneprodzerzhinsk State Technical University "Mechanization of production processes of fish industry, industrial and agrarian enterprises. Mechanics of a solid body ", Issue 13, 144–146 [In Russian].
- [6] Romaniuk A.D. (2013) Sintez peredatochnogo mehanizma optimalnogo po kriteriyu dinamichnosti [Synthesis of the transfer mechanism optimal by the criterion of dynamism] *Sbornik nauchnyh trudov Dneprodzerzhinskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta i Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta "Mehanika tverdogo tela Mehanizacija proizvodstvennyh processov rybnogo hozjajstva, promyshlennyh i agrarnykh predpriyatij"* – Collection of scientific works of the Dneprodzerzhinsk State Technical University and the Kerch State Marine Technological University "Mechanics of the solid body. Mechanization of production processes in the fishing industry, industrial and agricultural enterprises. ", Issue 14, 20–23 [In Russian].
- [7] Romaniuk A.D. (2013) Osnovnyie podhodyi resheniya zadach sinteza peredatochnykh mehanizmov na osnove optimizatsii ego harakteristik [Basic approaches to solving the synthesis transmission's problems of the mechanisms based on optimization of its characteristics] *Sbornik nauchnyh trudov Dneprodzerzhinskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta i Kerchenskogo gosudarstvennogo morskogo tehnologicheskogo universiteta "Mehanika tverdogo tela Mehanizacija proizvodstvennyh processov rybnogo hozjajstva, promyshlennyh i agrarnykh predpriyatij"* – Collection of scientific works of the Dneprodzerzhinsk State Technical University and the Kerch State Marine Technological University "Mechanics of the solid body. Mechanization of production processes in the fishing industry, industrial and agricultural enterprises. ", Issue 14, 24–26 [In Russian].
- [8] Romaniuk A.D., & Mamaev L.M., & Kabakov A.M., & Telepko L.P. (2016) Optimizatsiya peredatochnoy funktsii mehanizma [Optimization of the transfer functions of the mechanism] *Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Aktual'nye nauchnye dostizhenija - 2016"* – Materials of the XII international scientific and practical conference "Actual scientific achievements - 2016". (Vol. 11), (pp.14–17). Praha: Publishing House «Education and Science» [In Russian].
- [9] Romaniuk O.D. (2015) Vybir mahovyh mas lanok peredatochnykh mehanizmiv na osnovi optymizatsii' peredatochnoi' funktsii' [The choice of wing parts by weight of gear mechanisms based on optimizing the transfer function]. *Matematyčne Modeliuvannia –Mathematical modeling*, 2(33), 52–54 [in Ukrainian].
- [10] Romaniuk O.D. (2015) Optymizacija mas zubchastyh kolis mehanichnoi' peredachi na etapi poperedn'ogo proektuvannja [Optimization of the masses of gears mechanical transmission during

the preliminary design]. *Matematychni Modeliuvannia –Mathematical modeling*, 2(35), 35–38 [in Ukrainian].

- [11] Romaniuk O.D. (2018) Rozrobka matematy`chnoyi modeli obertal`ny`x vuzliv mexanichnoyi peredachi [Basic approaches to mass optimization of toothed wheels of mechanical transmission]. *Matematychni Modeliuvannia –Mathematical Modeling*, 1(38), 118–123 [in Ukrainian].

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБЕРТАЛЬНИХ ВУЗЛІВ МЕХАНІЧНОЇ ПЕРЕДАЧІ

Романюк О.Д.

### Реферат

При проектуванні приводу виконавчого органу машинного агрегату виникає необхідність зменшення амплітуди коливань швидкості ланки зведення, яка в основному вирішується способом використання додаткових махових мас, що збільшує вагу механізму та його інерційність. Щоб уникнути відповідних недоліків доцільніше проектувати нові передаточні механізми моменти інерції обертальних мас яких могли б виконувати функцію маховика.

При вирішенні поставленої проблеми необхідно підібрати на стадії попереднього проектування відповідну масу обертального вузла механічної передачі, яка б відповідала маховому моменту маховика. Задачі проектування механічних передач з урахуванням оптимізації кінематичних та силових характеристик приводу виконавчого органу машинного агрегату являються багатокритеріальними, так як виникає необхідність враховувати взаємно залежні параметри, особливо при розробці математичної моделі елементів складального вузла механічної передачі.

Особливістю проектування складальної одиниці вузла обертання механічної передачі при умові її оптимізації полягає в тому, що кількість невідомих величин проектування набагато більше ніж рівнянь зв'язку, що суттєво ускладнює і без того багатоваріантність задачі. Тому розглядається задача зменшення числа невідомих, а також встановлення впливу відповідних параметрів на характер зміни маси складальної одиниці, згідно якої було зменшено кількість перемінних величин з восьми до п'яти та вибрані обмеження для перемінних величин проектування.

Розроблена математична модель складальної одиниці вузла обертання механічної передачі на основі якої отримано залежності для розрахунку маси валу з підшипниками. Введення коефіцієнта конструктивного перерахунку геометричних параметрів валу та загального коефіцієнта конструктивного перерахунку геометричних параметрів обертального елемента моделі валу з підшипниками дають можливість оцінити масу валу чи масу обертального елемента в першому наближенні на етапі попереднього проектування, так як із проектного розрахунку відомо тільки вихідний діаметр валу.

Встановлено залежність маси обертального елемента моделі валу з підшипниками від нормативних вимог та відповідних стандартів які використовуються в процесі проектування складальних одиниць механічних передач з метою стабілізації кінематичних та динамічних характеристик машинного агрегату без використання додаткових мас.

### Література

1. Геминтерн В. Н., Коган Б. М. Методы оптимального проектирования: М.: Энергия, 1980. 160 с.
2. Соболев И.М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями: М.: Дрофа, 2006. 175 с.
3. Дженга Дж. Накопители кинетической энергии. Теория и практика современных маховичных систем: М.: Мир, 1988. 430 с.

4. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий: сб. науч. тр. / редкол.: Е. П. Масюткин (глав. ред.). Керчь: Выд-во КГМТУ, 2010. Вып. 11. 196 с.
5. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий. Механика твердого тела: сб. науч. тр. / редкол.: Е. П. Масюткин (глав. ред.). Керчь-Днепродзержинск: Выд-во ДГТУ, 2012. Вып. 13. 201 с.
6. Механика твердого тела. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий: сб. науч. тр. / редкол.: Е. П. Масюткин (глав. ред.). Днепродзержинск-Керчь: Выд-во ДГТУ, 2013. Вып. 14. 144 с.
7. Механика твердого тела. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий: сб. науч. тр. / редкол.: Е. П. Масюткин (глав. ред.). Днепродзержинск-Керчь: Выд-во ДГТУ, 2013. Вып. 14. 144 с.
8. Aktualni vedecke vymozenosti – 2016. Оптимизация передаточной функции механизма: materialy XII mezinarod. vedecko-prakt. konf., Praha, 22–30 ceryna 2016.r./ Education and Science, sefred. Z. Crnak. Praha: Education and Science, 2016. 120. s.
9. Математичне моделювання: зб. наук. пр. / М–во освіти і науки України, Дніпродзержинський державний технічний університет, голов. ред. С. Є. Самохвалов. Дніпродзержинськ, 2015. Вип. 2(33) 140 с.
10. Математичне моделювання: зб. наук. пр. / М–во освіти і науки України, Дніпровський державний технічний університет, голов. ред. С. Є. Самохвалов. Кам'янське, 2016. Вип. 2(35) 135 с.
11. Математичне моделювання: зб. наук. пр. / М–во освіти і науки України, Дніпровський державний технічний університет, голов. ред. Б. П. Серета. Кам'янське, 2018. Вип. 1(38) 223 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185047

UDC 669.013.002.5:531.3

**O.O. Beygul**, Doctor of Engineering Science, full professor, dstu.mo@i.ua

**D.I. Grischenko**, Post-graduate student, dstu.mo@i.ua

**V.O. Beygul**, Candidate of Engineering Science, associate Professor, dstu.mo@i.ua

**D.B. Sereda**, Candidate of Engineering Science, senior lecturer, dstu.mo@i.ua

Dniprovsky state technical university, Kamianske

## INVESTIGATION OF BAND LOOP FRAME ARTICULATED CONTAINER TRUCK STABILITY BY MOTION ON TECHNOLOGICAL ROADS

*Mathematical model of disturbance motion for articulated container truck with band loop frame on pneumatic wheels by different conditions of cross stabilization has been worked out by analytical mechanics method with Lagrange equation of second type. Analytical expressions of critical parameters of system, which define stability of articulated container truck in cross plane has been received.*

**Keywords:** *mathematical model; stability; articulated container truck; disturbance motion; band loop frame.*

*У роботі розроблена математична модель збуреного руху зчленованого контейнеровоза з бугельною рамою на пневмоколісному ході при різних умовах поперечної стабілізації методами аналітичної механіки з залученням рівняння Лагранжа другого роду. Отримані аналітичні вирази критичних швидкостей, які містять у собі параметри системи, що визначають стійкість зчленованого контейнеровоза у поперечній площині.*

**Ключові слова:** *математична модель; стійкість; зчленований контейнеровоз; збурений рух; бугельна рама.*

### The statement of the problem

The advancement of the metallurgical industry is closely linked to the continued growth of mechanization and automation of transport operations along technological lines, where new tasks are being set in the way of development of promising models of special vehicles. Thus, for carrying out operations related to the autonomous loading, transportation and unloading of containers, it is advisable to layout the carrier system with a tow frame.

The rowing layout of the carrier systems of technological vehicles is quite unconventional. As the review of the literature shows, only a few scientific works are devoted to such machines. If for the usual layout, especially in the general automotive industry, we have accumulated a wealth of experience in the development of mathematical models of perturbed motion, the formation of external loads, internal efforts, then for articulated container ships on a pneumatic wheel course with a tow frame everything has to be done for the first time.

For scientifically sound choice of such carrier systems, dynamic loads play a decisive role, the formation of which is described by a mathematical model of the process of perturbed motion of a container ship in conditions of technological roads of metallurgical production.

### Analysis of basic research and publications

The development and construction of container transporters with a tow frame are in the initial stages of development, so we consider the problem from a more general point of view. Thus, works [1-3] are devoted to the study of special vehicles for the transport of goods in containers and packages in various industries. The work [4,5] dedicated to the design and construction of articulated skid steer carriers is of course preceded by a fundamental work [6] to investigate the dynamics of self-propelled swivel machines, including oscillation and movement stability. The works [7-9] are devoted to the dynamics of two-link mechanical systems, which according to the calculation schemes are similar to articulated containers with a tow frame. The work [10] is devoted to the study of the dynamics of perturbed motion of an articulated special vehicle with a U - shaped cargo frame.

### Formulation of the purpose of the study

From the above analysis, it follows that the known mathematical models of the perturbed motion of technological special vehicles do not take into account the layout features of articulated containers with a tow carrier system. There are practically no materials in the scientific literature devoted to the research and development of metallurgical container ships with a tow frame, with the obvious relevance of such machines in technological lines of metallurgical enterprises.

Thus, it is possible to formulate the following research goal: to find out the influence of the stabilizer of lateral stability in the elastic suspension of the tow frame on the critical stability of the speed of movement of a container ship with different level of stabilization.

### The main material

Shown in Fig. In Fig. 1 an articulated container vessel with a tow frame on the side, shown in Fig. 2 shows the design scheme of the container carrier on the rear view.

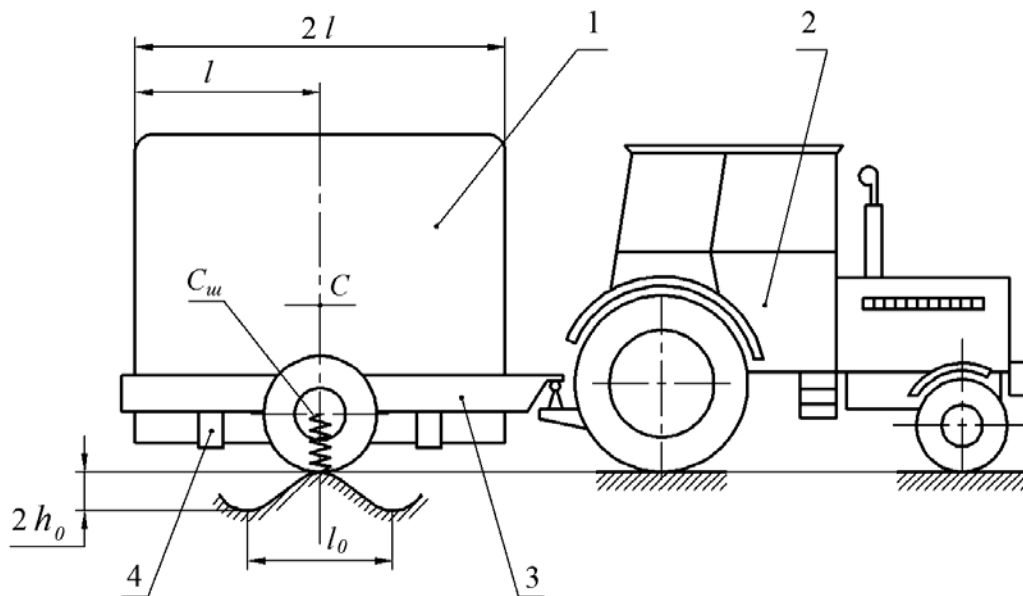


Fig. 1. Articulated container ship with a tow frame: 1 — container; 2 — tractor; 3 — semi-trailer with tow frame; 4 — lodging

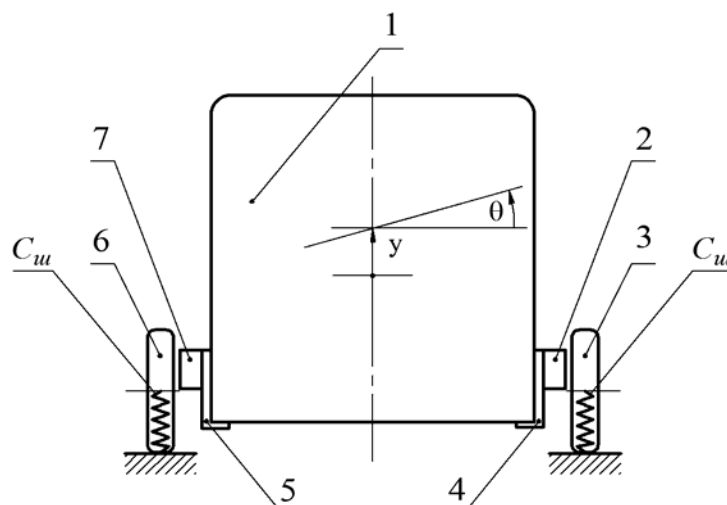


Fig. 2. The articulated container vessel on the rear view: 1 — container; 2 — right frame spar; 3 — right wheel of a semi-trailer suspension; 4 — right lodging; 5 — left lodging; 6 — left semi-trailer suspension wheel; 7 — left frame spar

The perturbation equation is obtained in the form of the second-kind Lagrange equation [11].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} = - \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} + Q_j, \quad (1)$$

where  $T$  — the kinetic energy of the system, J;  $\Pi$  — the potential energy of the system, J;  $q_j$  —  $j$ -a the generalized coordinate, m (rad);  $Q_j$  —  $j$ -a the generalized force of non-conservative origin, N (N·m).

In this case  $q_1 = y$ ,  $q_2 = \theta$ , where  $y$  — vertical displacement of the semi-trailer, a  $\theta$  — the angle of the semi-trailer in the transverse plane.

The kinetic energy of the system:

$$T = \frac{m_c \dot{y}^2}{2} + \frac{I_c \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2}, \quad (2)$$

where  $m_c$  — the total mass of the semi-trailer, kg;  $I_c$  — semitrailer total moment of inertia relative to the longitudinal axis, which runs through the center of mass of the system, kg·m<sup>2</sup>;  $v$  — system speed, m/s.

The potential energy of the system is realized by the energy of compressed air in the tires of the wheels, takes the following form:

$$\Pi = \frac{C_{uu}}{2} (y - l_k \theta)^2 + \frac{C_{uu}}{2} (y + l_k \theta - h_n)^2, \quad (3)$$

where  $C_{uu}$  — radial rigidity of a semi-trailer wheel tire, N/m;  $l_k$  — half track of semi-trailer, m;  $h_n$  — lifting of the right wheel of a semi-trailer on inequalities of a sinusoidal profile, m.

In general form can be written

$$h_n = h_0 \sin \frac{2\pi x}{l_0}, \quad (4)$$

where  $h_n$  — висота нерівностей, m;  $h_0$  — the amplitude value of the inequality profile, m;  $x$  — abscissa of the approximate function of inequalities, m;  $l_0$  — length of sine wave that approximates the function of inequalities, m.

When the system is moving

$$x = vt. \quad (5)$$

In view of expression (5), the lift of the right wheel of the semi-trailer is equal

$$h_n = h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \quad (6)$$

Neglecting the forces of non-conservative origin, we substitute expressions of kinetic and potential energies in the second-kind Lagrange equation (1).

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} = \frac{\partial}{\partial \dot{y}} \left( \frac{m_c \dot{y}^2}{2} + \frac{I_c \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2} \right) = m_c \dot{y};$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = \frac{d}{dt} (m_c \dot{y}) = m_c \ddot{y};$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{m_c \dot{y}^2}{2} + \frac{I_c \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2} \right) = 0;$$



$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Pi}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{C_{uu}}{2} (y - l_{\kappa} \theta)^2 + \frac{C_{uu}}{2} (y + l_{\kappa} \theta - h_n)^2 \right] = \\
&= \frac{C_{uu}}{2} \cdot 2(y - l_{\kappa} \theta) \cdot 1 + \frac{C_{uu}}{2} \cdot 2(y + l_{\kappa} \theta - h_n) \cdot 1 = \\
&= C_{uu} y - C_{uu} l_{\kappa} \theta + C_{uu} y + C_{uu} l_{\kappa} \theta - C_{uu} h_n = 2C_{uu} y - C_{uu} h_n.
\end{aligned}$$

Combining the expressions obtained, we write the first differential equation:

$$\begin{aligned}
m_c \ddot{y} + 2C_{uu} y &= C_{uu} h_n. \tag{7} \\
\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} &= \frac{\partial}{\partial \dot{\theta}} \left( \frac{m_c \dot{y}^2}{2} + \frac{I_c \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2} \right) = I_c \dot{\theta}; \\
\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) &= \frac{d}{dt} (I_c \dot{\theta}) = I_c \ddot{\theta}; \\
\frac{\partial T}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{m_c \dot{y}^2}{2} + \frac{I_c \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2} \right) = 0;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \Pi}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{C_{uu}}{2} (y - l_{\kappa} \theta)^2 + \frac{C_{uu}}{2} (y + l_{\kappa} \theta - h_n)^2 \right] = \\
&= \frac{C_{uu}}{2} \cdot 2(y - l_{\kappa} \theta) \cdot (-l_{\kappa}) + \frac{C_{uu}}{2} \cdot 2(y + l_{\kappa} \theta - h_n) \cdot l_{\kappa} = \\
&= -C_{uu} l_{\kappa} y + C_{uu} l_{\kappa}^2 \theta + C_{uu} l_{\kappa} y + C_{uu} l_{\kappa}^2 \theta - C_{uu} l_{\kappa} h_n = 2C_{uu} l_{\kappa}^2 \theta - C_{uu} l_{\kappa} h_n.
\end{aligned}$$

Combining the expressions obtained, we write the second differential equation:

$$I_c \ddot{\theta} + 2C_{uu} l_{\kappa}^2 \theta = C_{uu} l_{\kappa} h_n. \tag{8}$$

Rewrite the equation (7) and (8) on the basis of expression (6):

$$m_c \ddot{y} + 2C_{uu} y = C_{uu} h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t; \tag{9}$$

$$I_c \ddot{\theta} + 2C_{uu} l_{\kappa}^2 \theta = C_{uu} l_{\kappa} h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \tag{10}$$

We write down equations (9) and (10) with the introduction of new notation

$$\ddot{y} + p_y^2 y = \frac{C_{uu}}{m_c} h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t, \tag{11}$$

where  $p_y^2 = \frac{2C_{uu}}{m_c}$  — the square of the natural circular frequency of the system in the generalized coordinate  $y$ ,  $c^{-2}$ ;

$$\ddot{\theta} + p_{\theta}^2 \theta = \frac{C_{uu} l_{\kappa}}{I_c} h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t, \tag{12}$$

where  $p_{\theta}^2 = \frac{2C_{uu} l_{\kappa}^2}{I_c}$  — the square of the natural circular frequency of the system in the generalized coordinate  $\theta$ ,  $c^{-2}$ .

Equations (11) and (12) have the following form:

$$y = C_1 \cos p_y t + C_2 \sin p_y t + \frac{C_{uu} h_0}{m_c \left( p_y^2 + \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_1 \right), \tag{13}$$

$$\theta = C_3 \cos p_\theta t + C_4 \sin p_\theta t + \frac{C_{ul\kappa} h_0}{I_c \left( p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_2 \right). \quad (14)$$

The first two additions in expressions (13) and (14) describe the free oscillations of the system, which are determined by the initial conditions and, after a while, disappear. Remain forced oscillations, which are described as follows:

$$y = \frac{C_{ul} h_0}{m_c \left( p_y^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_1 \right), \quad (15)$$

$$\theta = \frac{C_{ul\kappa} h_0}{I_c \left( p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_2 \right). \quad (16)$$

Directly from expression (16) we obtain the condition of loss of stability of the semitrailer in the transverse plane during asymmetric kinematic perturbation

$$p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} = 0 \quad (17)$$

or after opening its own circular frequency  $p_\theta$

$$\frac{2C_{ul\kappa} l_\kappa^2}{I_c} - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} = 0. \quad (18)$$

From where do we get the critical speed at which the stability of a semi-trailer container carrier in the transverse plane occurs:

$$v_{kp} = \frac{l_\kappa l_0}{\pi} \sqrt{\frac{C_{ul}}{2I_c}}. \quad (19)$$

To increase the lateral stability of the system, due to the high position of the center of mass of the container carrier, we include a stabilizer of the transverse stability in the suspension of the trailer part, which is taken into account in the calculation model by introducing equivalent stiffness of the suspension during oblique symmetry perturbations.

Again, we incorporate the second-kind Lagrange equation (1) into the mathematical model.

In this case, the system has two degrees of freedom when  $q_1 = y$ ,  $q_2 = \theta$ , where  $y$  — vertical movement of the semi-trailer, and  $\theta$  — the angle of the semi-trailer in the transverse plane.

The kinetic energy of the system:

$$T = \frac{m_n \dot{y}^2}{2} + \frac{I_n \dot{\theta}^2}{2} + \frac{m_c v^2}{2}, \quad (20)$$

where  $m_n$  — the mass of the sprung parts of the semi-trailer, kg;  $I_n$  — moment of inertia of the sprung parts of the semi-trailer regarding to the longitudinal axis passing through the center of mass of these parts, kg·m<sup>2</sup>;  $m_c$  — the total mass of the semi-trailer, kg;  $v$  — system speed, m/s.

Potential energy of the system:

$$\Pi = \frac{C_e}{2} (y - l_\kappa \theta)^2 + \frac{C_e}{2} (y + l_\kappa \theta - h_\Pi)^2 + \frac{C_\beta}{2} \theta^2, \quad (21)$$

where  $C_e$  — coefficient of equivalent rigidity of the elastic suspension, N/m;  $C_\beta$  — coefficient of angular stiffness of the stabilizer of lateral stability, N/m;  $l_\kappa$  — half track of semi-trailer, m;  $h_\Pi$  — lifting of the right wheel of a semi-trailer on inequalities of a sinusoidal profile, m.

The coefficient of equivalent rigidity is determined by the formula

$$C_e = \frac{C_{III} C_{II}}{C_{III} + C_{II}}, \quad (22)$$

where  $C_{III}$  — radial stiffness coefficient of suspension pneumatics, N/m;  $C_{II}$  — the coefficient of rigidity of the suspension, N/m.

The angular stiffness coefficient of the lateral stabilizer is as follows:

$$C_{\beta} = C_c \frac{l_c^2}{2}, \quad (23)$$

where  $C_c$  — коефіцієнт лінійної жорсткості стабілізатора поперечної стійкості, N/m;  $l_c$  — the length of the stabilizer, which works on torsion at warps of the sprung parts, m.

In general form can be written

$$h_{II} = h_0 \sin \frac{2\pi x}{l_0}, \quad (24)$$

where  $h_{II}$  — height of inequalities, m;  $h_0$  — the amplitude value of the inequality profile, m;  $x$  — abscissa of the approximate function of inequalities, m;  $l_0$  — the length of a sine wave that approximates the function of inequalities, m.

When moving the system

$$x = vt. \quad (25)$$

In view of expression (25), the lift of the right wheel of the semi-trailer is equal

$$h_n = h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \quad (26)$$

Neglecting the forces of non-conservative origin, we substitute the kinetic and potential energies in the second-kind Lagrange equation (1), and obtain the following system of equations

$$\left. \begin{aligned} m_{II} \ddot{y} + 2C_e y &= C_e h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t; \\ I_{II} \ddot{\theta} + (2C_e l_{\kappa}^2 + C_{\beta}) \theta &= C_e l_{\kappa} h_0 \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

The first equation of system (27) is divided into  $m_{II}$ , other — into  $I_{II}$ , we get:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} + \frac{2C_e}{m_{II}} y &= \frac{C_e h_0}{m_{II}} \sin \frac{2\pi v}{l_0} t; \\ \ddot{\theta} + \frac{2C_e l_{\kappa}^2 + C_{\beta}}{I_{II}} \theta &= \frac{C_e l_{\kappa} h_0}{I_{II}} \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

We enter the following notation:

$$\frac{2C_e}{m_{II}} = p_y^2; \quad (29)$$

$$\frac{2C_e l_{\kappa}^2 + C_{\beta}}{I_{II}} = p_{\theta}^2. \quad (30)$$

Rewrite the system (28) with the notation (29) and (30):

$$\left. \begin{aligned} \ddot{y} + p_y^2 y &= \frac{C_e h_0}{m_{II}} \sin \frac{2\pi v}{l_0} t; \\ \ddot{\theta} + p_{\theta}^2 \theta &= \frac{C_e h_0 l_{\kappa}}{I_{II}} \sin \frac{2\pi v}{l_0} t. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

The solutions of equations (31) are given

$$y = C_1 \cos p_y t + C_2 \sin p_y t + \frac{h_0 p_y^2}{2 \left( p_y^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_1 \right); \quad (32)$$

$$\theta = C_3 \cos p_\theta t + C_4 \sin p_\theta t + \frac{C_e h_0 l_k p_\theta^2}{(2C_e l_k^2 + C_\beta) \left( p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_2 \right). \quad (33)$$

In expressions (32) and (33), the first two additions describe the free oscillations of a fast-decaying system and cannot be taken into account. In this case, the solution of equations (31) can be written as follows:

$$y = \frac{h_0 p_y^2}{2 \left( p_y^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_1 \right), \quad (34)$$

$$\theta = \frac{C_e h_0 l_k p_\theta^2}{(2C_e l_k^2 + C_\beta) \left( p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} \right)} \sin \left( \frac{2\pi v}{l_0} t - \psi_2 \right), \quad (35)$$

where  $\psi_i$  — phase angle, rad.

From these solutions, we write the condition of loss of stability of the system in transverse oscillations at skew symmetry perturbations.

$$p_\theta^2 - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} = 0 \quad (36)$$

or after disclosure  $p_\theta^2$ :

$$\frac{2C_e l_k^2 + C_\beta}{I_\Pi} - \frac{4\pi^2 v^2}{l_0^2} = 0. \quad (37)$$

Where do we get the critical speed at which the system loses stability.

$$v_{kp} = \frac{l_0}{2\pi} \sqrt{\frac{2C_e l_k^2 + C_\beta}{I_\Pi}}. \quad (38)$$

### Conclusions and prospects for further research

As a result of the theoretical study of the dynamics of a articulated container ship with a tow frame on a pneumatic wheel, a mathematical model of perturbed motion in the transverse plane was developed taking into account the different level of stabilization of the trailer on the basis of the mathematical apparatus of analytical mechanics with engaging.

The developed mathematical model of the perturbed motion in the transverse plane is the basis for determining the critical speed of movement of the container vessel in the absence and presence of the stabilizer of the transverse stability.

In further studies of container ships with a tow frame on a pneumatic wheel it is necessary to work in the direction of development of new types of stabilizers of cross resistance with rational metal content, structural perfection.

### References

- [1] Griff M.I., Zatvan R.A., Trofimenko V.F. *Avtotransportnye sredstva s gruzopodyomnymi ustroystvami dlia perevozky v konteinerah i paketah* [Motor-vehicle transport means with lifting power gear for load transportation in containers and packets]. Moscow, 1989, 159 p. (in Russian).

- [2] Grushnikov V.A. *Vibor transportnih sredstv dlia containernoy dostavky stroitelnyh gruzov* [Selection of transportal means for container lift of structural loads]. Industrial transport, 1987, no.11, p.7 (in Russian).
- [3] Pashkov A.K., Polyarin Y.N. *Paketirovaniye i perevozka tarnoshtuchnih gruzov* [Piling and transportation of container loads]. Moscow, 200, 254 p. (in Russian).
- [4] Zolotaryov A.F., Totskiy I.A. *Konteinerovoz na baze traktora T-150K* [Container truck by base tractor T-150K]. Industrial transport, 1979, no. 6, p. 22 (in Russian).
- [5] Beygul O.A., Korniychuk M.M., Lepetova A.L., Nayda D.V. *Doslidzhennia ta vibir tipu nesuchoyi sustemy avtoskrapovoza z U- podibnoyu ramoyu* [Investigation and selection of load-carrying system container truck with U-similar frame type]. Reliability of metallurgical equipment: Sciences works of International conference 28-31.10.2013. pp. 138–141 (in Ukrainian).
- [6] Malinovskiy E.Y., Gaytsory M.M. *Dinamika samohodnih mashin s sharnirnoy ramoy (Kolebaniya i ustoichivost dvizheniya)* [Dynamics of automotive vehicles with hinger frame (vibrations and stability of traffic)]. Moscow, 1974, 172p. (in Russian).
- [7] Veselov H.P., Hustomyasov A.N., Kolmacov V.I. *Analiticheskoye issledovaniye kolebaniy sistemy «tiagach-pritsep»* [Analytical investigation of system «tractor-trailer» vibrations]. News of universities: Engineering, 1988, no. 5 pp. 92–97 (in Russian).
- [8] Lobas L.H., Vaschenko Y.L. *Dinamicheskoye povedeniye dvuhzvennogo avtopoezda vblizy granitsy oblasti ustoichivosti* [Dynamical behaviour of twin-section motor-vehicle by boundary line stability]. Applied mathematic, 1991, no. 12, pp. 85–91 (in Russian).
- [9] Beygul V.O., Leepa I.I., Lepetova A.L. *Matematichna model zburenogo ruhu sustemy «buxirovshchyk-avtosamockyd»* [Mathematical model of disturbance motion for system «motor tugging rear dumper»]. Sciences works «system technology», 2006, no.4(45), pp. 94–98 (in Ukrainian).
- [10] Beygul O.A., Lepetova A.L. *Dinamika zburenogo ruchu zchlenovanogo spetsavtotransportnogo zasobu z U-podibnoyu vantazhnoyu ramoyu* [Dynamics of articulated special transport with band loop load frame motion disturbance]. Sciences works KSSTU: Mechanics of hard body, 2013, no.15, pp. 15–20 (in Ukrainian).
- [11] Yablonskiy A.A., Noreico S.S. *Curs teorii kolebaniy* [Science of vibrations theory]. Moscow, 1966, 255p. (in Russian).
- [12] Bronshtein I.N., Semendiaev K.A. *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov i uchaschihsia vtuzov* [Mathematical reference book for engineers and students of technical university]. Moscow, 1986, 544p. (in Russian).

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ СТІЙКОСТІ БУГЕЛЬНИХ НЕСУЧИХ СИСТЕМ ЗЧЛЕНОВАНИХ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ ПРИ РУСІ ПО ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОРОГАХ**

**Бейгул О.О., Грищенко Д.І., Бейгул В.О., Серета Д.Б.**

### **Реферат**

Мета роботи — отримання нових співвідношень у математичній моделі збуреного руху зчленованого контейнеровоза з бугельною рамою на пневмоколісному ході під час руху технологічними дорогами промислових підприємств. Основним джерелом збурень є кососиметричні кінематичні збурення з боку нерівностей покриття технологічних доріг, які апроксимуються гармонічними функціями вздовж колії. Основою математичного апарату теоретичного дослідження є методологія аналітичної механіки з використанням рівняння Лагранжа другого роду. Об'єкт дослідження зводиться до динамічної системи з двома ступенями свободи, де узагальнені координати представлені лінійними та кутовими переміщеннями несучої системи контейнеровоза, що призводить до складання двох диференціальних рівнянь руху. Права частина цих рівнянь описує параметри кінематичних збурень. З розв'язання диференціальних рівнянь збу-

реного руху контейнеровоза з бугельною рамою за наявності кососиметричних кінематичних збурень виходять власні динамічні характеристики системи, умова стійкості при поперечних коливаннях зчленованого контейнеровоза, отримується умова для визначення критичної швидкості, при якій система втрачає стійкість. Розроблена математична модель сприяє активному втручання на стадії проектування у параметри коливань зчленованого контейнеровоза з бугельною рамою на пневмоколісному ході шляхом вибору відповідних жорсткісних характеристик стабілізатора поперечної стійкості. Отримані співвідношення демонструють алгоритм впливу на параметри системи на етапі розробки конструкції з метою створення ідеальної моделі зчленованого контейнеровоза з бугельною рамою на пневмоколісному ході, що гарантує велику практичну значимість дослідження.

### Література

1. Грифф М.И., Затван Р.А., Трофименко В.Ф. Автотранспортные средства с грузоподъемными устройствами для перевозки грузов в контейнерах и пакетах. М.: Транспорт, 1989. 159 с.
2. Грушников В.А. Выбор транспортных средств для контейнерной доставки строительных грузов. *Промышленный транспорт*. 1987. №11. С. 7.
3. Пашков А.К., Полярин Ю.Н. Проектирование и перевозка тарно-штучных грузов. М.: Транспорт, 2000. 254 с.
4. Золотарев А.Ф., Тоцкий И.А. Контейнеровоз на базе трактора Т-150К. *Промышленный транспорт*. 1979. №6. С. 22.
5. Дослідження та вибір типу несучої системи автоскrapовоза з U-подібною рамою / О.О. Бейгул та ін. Надійність металургійного обладнання: Зб. наук. праць з мат. Міжнар. наук.-прак. конф., м. Дніпропетровськ, 28-31 жовтня 2013р. / НМетАУ. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. С. 138–141.
6. Малиновский Е.Ю., Гайцгори М.М. Динамика самоходных машин с шарнирной рамой (колебания и устойчивость движения). М.: Машиностроение, 1974. 172 с.
7. Веселов Г.П., Густомясов А.Н., Колмаков В.И. Аналитическое исследование колебаний системы тягач-прицеп. *Известия вузов. Машиностроение*. 1988. №5. С. 92–97.
8. Лобас Л.Г., Ващенко Ю.Л. Динамическое поведение двухзвенного автопоезда вблизи границы области устойчивости. *Прикладная математика*. 1991. Т.27. №12. С. 85–91.
9. Бейгул В.О., Лєспа І.І., Лєпетова Г.Л. Математична модель збуреного руху системи «буксировщик-автосамоскид». *Системні технології*. 2006. Вип. 4(45). С. 94–98.
10. Бейгул О.О., Лєпетова Г.Л. Динаміка збуреного руху зчленованого спецавтотранспортного засобу з U-подібною вантажною рамою: сб. науч. тр. КГМТУ «Механика твердого тела. Механизация производственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий». Керь: КГМТУ, 2013. Вып. 15. С. 15–20.
11. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. М.: Высшая школа, 1966. 255 с.
12. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., испр. М.: Наука, 1986. 544 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185048

UDC 51-74

**Y.M. Golovko**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Associate Professor, yngolovko@gmail.com

**D.V. Klymenko**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, dinklimspring@gmail.com

**O.O. Sdvyzhkova**, Doctor of Technical Sciences, Professor, sdvyzhkova@gmail.com  
NTU Dnipro Polytechnic, Dnipro

## PROBABILITY MODEL FOR THE ERROR ESTIMATION AT SEISMIC-ACOUSTIC FORECAST WHILE COAL MINING

*Seismic-acoustic method is widely used currently to predict rock bursts and outbursts in coal mines. To improve this method the two prognostic criteria model is developed to avoid the forecast errors. The proposed mathematical model provides decreasing the probability of type I errors ("false positive") without significant growth of type II errors ("false negative"). The probabilistic model proposed takes into consideration a time parameter as well.*

**Keywords:** probability model; seismic-acoustic method; outburst forecast.

*На даний час широко застосовується сейсмоакустичний метод для прогнозування гірських ударів і викидів гірських порід у вугільних шахтах. Для вдосконалення цього методу розроблено модель з двома прогностичними критеріями, щоб уникнути помилок прогнозу. Запропонована математична модель передбачає зменшення ймовірності помилок I роду ("помилково позитивних") без істотного зростання помилок II роду ("помилково негативних") та враховує часовий параметр.*

**Ключові слова:** ймовірнісна модель; сейсмоакустичний метод; прогноз викидів.

### Formulation of the problem

The study of gas-dynamic phenomena mechanism in mines [1] is one of the key tasks associated with the coal and gas outburst prediction.

Seismic-acoustic method is widely used currently to predict the rock bursts and outbursts in coal mines. Nevertheless, the average level of the method reliability is 60—70 % [2]. The probability of type II errors ("false negative") at predicting is about 3 % [3]. But the availability of type I errors ("false positive") can be significant [5]. The probability of such error occurrence should be decreased, but at the same time increasing the type II errors ("false negative") must be excluded.

### Analysis of recent investigations and publications

The outburst forecast at coal mining based on acoustic signals involves a hazard index developed in [5]:

$$K_{\theta} = \frac{A_{\theta}}{A_H},$$

where  $A_{\theta}$  is an amplitude of high-frequency component in acoustic signal spectrum recorded in the rock mass while mining operations,  $A_H$  is an amplitude of the low-frequency component in this spectrum. To improve the forecast technics the prognostic model has been developed by involving additional index [6]:

$$K_S = \frac{S_{\theta}}{S},$$

where  $S_{\theta}$  is the spectrum area corresponding to the high-frequency component,  $S$  is a general area of the amplitude-frequency spectrum. Values  $S_{\theta}$  and  $S$  can be determined by spectral estimation of signals generated by rock-destruction mechanisms:

$$S = \Delta \vartheta \cdot \sum_{i=0}^{i \max} A_i, \quad S_B = \Delta \vartheta \cdot \sum_{i:700 < \vartheta < 1250} A_i,$$

where  $A_i, i = 0, i \max$  are the amplitude magnitude,  $\Delta \vartheta$  is the frequency step of the considered spectrum area. The amplitude spectrum can be estimated by the fast Fourier transformation [10].

The critical value of the prognostic index  $K_\theta$  should be determined and adjusted in accordance with the appendix P.8 [4] individually for different types of excavations. The critical value of the prognostic index  $K_S$  alters obviously within the range [0, 1] and should be estimated based on practical observations.

Respectively the criteria should be held to identify the hazard situation:

$$K_\theta = \frac{A_\theta}{A_H} \geq K_\theta^* \quad (1)$$

for some interval of time  $\Delta t$  and

$$K_S = \frac{S}{S} \geq K_S^*, \quad (2)$$

where  $K_\theta^*$  is the critical value of the prognostic index  $K_\theta$ ,  $K_S^*$  is the critical value of the prognostic index  $K_S$ . The criterion (2) proposed in [6] is based on studying the crack initiation under the harmonic and static stress components [7, 8].

The probability of type I errors ("false positive") according to the criterion (1) alters in the range from 5 % to 47 % [5]. That is why this criterion requires some varies to decrease the probability of these errors. That is why the new model has been developed [6] for simultaneous applying both outburst hazard criteria to improve the gas-dynamic phenomena prediction. To prove the effectiveness of the proposed model the probability of forecast errors should be estimated.

### Formulation of the research objective

An algorithm should be developed using prognostic indices  $K_\theta$ ,  $K_S$  to improve the seismic-acoustic method for predicting gas-dynamic phenomena in mines. That is why the proposed model in [6] should be corrected to decrease the probability of type I errors ("false positive") without increasing probability of type II errors ("false negative").

### Statement of the main material

#### *Estimating the probability of an error occurring at the outburst forecast based on acoustic signals.*

While coal mining the special seismic bureau must give message «hazardous», if the criterion (1) is fulfilled during the time interval  $\Delta t$  and over.

The criterion (1) can be corrected by increasing the critical value  $K_\theta^*$  and/or by increasing the time interval  $\Delta t$ . These alters provide decreasing the probability of the type I errors («false positive»). But at the same time such varies obviously increase the probability of the type II errors («false negative») representing greatest hazard.

Physical interpretation of the criterion (1) is following. Gas-dynamic phenomena are associated with crack initiation identified by growing of high-frequency component of the spectrum  $A_\theta$  [5]. Hence, increasing of the value  $A_\theta$  means increasing the ratio (1). However, the prognostic indicator  $K_\theta$  can grow as well if its denominator decreases. But decreasing of low-frequency component of the spectrum  $A_H$  does not mean dangerous situation in rock mass [10] and does not identifies gas-dynamic onset.



This fact can be substantial reason for the type I errors («false positive») while applying the criterion (1). The criterion (2) has not this flaw because depends on the amplitude spectrum integral. The physical interpretation of the prognostic index  $K_S$  is the ratio of the high-frequency oscillations power to the total oscillations power at given «point» of the study.

As mentioned above the two-criteria outburst model that included prognostic indicators  $K_G$  and  $K_S$  has been developed [6]. But the model fetches have not been founded and the introduction of a time parameter has not been done. That is why this paper focused on developing the probability models of occurring both type errors («false positive» and «false negative») while acoustic analysis.

To identify different level of hazard we introduce two notions:

- possible hazardous rock state/possible not hazardous rock state,
- hazardous rock state/not hazardous rock state.

First notion means fulfillment/non-fulfillment of criteria (1) and (2), second notion means making decision based on the observations over a time period  $\Delta T$ .

Additionally, following notations should be involved:

$H_0$  = {not hazardous rock state} is a primary hypothesis;

$\overline{H_0}$  = {hazardous rock state} is an alternative hypothesis.

Such events should be discussed:

$A_i$  = {the signal is «possible not hazardous rock state» according to the  $i$ -th criterion};

$\overline{A_i}$  = {the signal is «possible hazardous rock state» according to the  $i$ -th criterion};

$B$  = {decision «not hazardous rock state»};

$\overline{B}$  = {decision «hazardous rock state»};

$H_0 A_i$  = {type I errors according to the  $i$ -th criterion («false positive»)};

$\overline{H_0 A_i}$  = {type II errors according to the  $i$ -th criterion («false negative»)};

$H_0 \overline{B}$  = {decision has a type I error};

$\overline{H_0 B}$  = {decision has a type II error}.

$\alpha_i = P_{H_0}(\overline{A_i})$  is type I error probability according to the  $i$ -th criterion;

$\beta_i = P_{\overline{H_0}}(A_i)$  is type II error probability according to the  $i$ -th criterion;

$\alpha = P_{H_0}(\overline{B})$  is type I error probability of made decision;

$\beta = P_{\overline{H_0}}(B)$  is type II error probability of made decision.

The type I and II errors probabilities are determined by the criterion function:

$$B = f(\varphi_1, \varphi_2),$$

where  $\varphi_1$  is a function with respect of prognostic indicator  $K_G$ ,  $\varphi_2$  is a function with respect of prognostic indicator  $K_S$ .

Consider two possible variants for the decision making. First variant is following. Let the criterion function be

$$B = A_1 A_2. \quad (3)$$

In this case we make a decision «not hazardous rock state» when both criteria show the prediction «possible not hazardous rock state». Then opposite event looks like  $\overline{B} = \overline{A_1 A_2} = \overline{A_1} + \overline{A_2}$ . The type I errors probability of making decision can be estimated in such way:

$$\begin{aligned} \alpha &= P_{H_0}(\overline{B}) = P_{H_0}(\overline{A_1} + \overline{A_2}) = P_{H_0}(\overline{A_1}) + P_{H_0}(\overline{A_2}) - P_{H_0}(\overline{A_1})P_{H_0|\overline{A_1}}(\overline{A_2}) = \\ &= \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1\alpha_{2(1)} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot \left(1 - \alpha_{2(1)} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

and the type II errors probability looks like:

$$\beta = P_{\overline{H_0}}(B) = P_{\overline{H_0}}(A_1 A_2) = P_{\overline{H_0}}(A_1)P_{\overline{H_0}|A_1}(A_2) = \beta_1\beta_{2(1)}, \quad (5)$$

where  $\alpha_{2(1)}$  and  $\beta_{2(1)}$  are the type I and II errors probabilities according to the criterion (2) respectively under condition that the type I errors also has occurred according to the criterion (1).

If the errors are independent according to different criteria, then  $\alpha_{2(1)} = \alpha_2$  and  $\beta_{2(1)} = \beta_2$ . However, this situation should be considered as extreme one because the obvious dependence between events  $A_1$  and  $A_2$  exists. That is why we suppose the probabilities satisfy the inequality  $\alpha_{2(1)} > \alpha_2$  and  $\beta_{2(1)} > \beta_2$ .

It can be seen from the expression (4) that the type I error («false positive») probability increases, but at the same time the type II error («false negative») probability decreases according to the expression (5). The result obtained goes against the constitutive idea of the model that aims decreasing the type I errors probability in the hazard forecast.

Consider second possible variant for the decision making. Let the criterion function be

$$B = A_1 + A_2. \quad (6)$$

In this case we decide «not hazardous rock state» when at least one of the criteria shows the prediction «possible not hazardous rock state».

Then opposite event is  $\overline{B} = \overline{A_1 + A_2} = \overline{A_1} \overline{A_2}$  and

$$\alpha = P_{H_0}(\overline{B}) = P_{H_0}(\overline{A_1} \overline{A_2}) = P_{H_0}(\overline{A_1}) \cdot P_{H_0|\overline{A_1}}(\overline{A_2}) = \alpha_1 \cdot \alpha_{2(1)}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \beta &= P_{\overline{H_0}}(B) = P_{\overline{H_0}}(A_1 + A_2) = P_{\overline{H_0}}(A_1) + P_{\overline{H_0}}(A_2) - P_{\overline{H_0}}(A_1)P_{\overline{H_0}|A_1}(A_2) = \\ &= \beta_1 + \beta_2 - \beta_1 \cdot \beta_{2(1)} = \beta_1 + \beta_2 \cdot \left(1 - \beta_{2(1)} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Obviously, the type I error («false positive») probability decreases according to the equation (7). At the same time the type II error («false negative») probability increases according to the equation (8) because of summarizing quantities  $\beta_1, \beta_2$ . However according to experimental data [5] the probabilities  $\beta_1, \beta_2, \beta_{2(1)}$  are sufficiently small. That is why the type II error probability growth in the equation (8) is not significant. Obtained result provides decreasing the type I error probability in hazard forecast.

Thus, the variant of decision making according the model (6) meets the requirements of prediction «not hazardous rock state».

It should be noted that making decision «not hazardous rock state» according to the criterion (2) is not sufficiently confirmed experimentally. That is why it should be entered a twice time interval in criterion (1) to check the criterion (2) fulfillment. As a result the prediction «not hazardous rock state» looks like:

$$(A_1 + A_2) \Big|_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} \cdot A_1 \Big|_{t \in [t_1, t_1 + 2 \cdot \Delta T]}, \quad (9)$$

where  $t_0, t_1$  are arbitrary time moments in the interval investigated.

Then the prediction «not hazardous rock state» according to the developed model (9) can be represented:

$$\left[ (K_B < K_B^*) + (K_S < K_S^*) \right]_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} \cdot (K_B < K_B^*)_{t \in [t_1, t_1 + 2 \cdot \Delta T]}. \quad (10)$$

The opposite prediction «hazardous rock state» according to the developed model (9) looks like:

$$\left[ (K_B > K_B^*) \cdot (K_S > K_S^*) \right]_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} + (K_B > K_B^*)_{t \in [t_1, t_1 + 2 \cdot \Delta T]}. \quad (11)$$

The numerical estimation of the type I errors probabilities has been made involving statistical data accumulated at different regions of coal mining [5]. The type I errors probabilities decreased up to 1,5—2,1 time approximately on making decision «not hazardous rock state» (10). Let us prove it.

The type I error probability while using only the criterion (1) is 0,05—0,47 for various coal mines according to experimental data, thus,  $\alpha_1 \in [0,05; 0,47]$ . Then the type I error probability in the criterion (2) can be as follows: 1)  $\alpha_2 \leq 0,47$ , 2)  $\alpha_2 > 0,47$ .

The variant «not hazardous rock state» according to the model (6) provides the type I error probability decreasing in  $\frac{1}{\alpha_{2(1)}}$  time according to expression (7), where  $\alpha_{2(1)}$  is the type I error probability in the criterion (2) respectively under the condition that the type I error also has occurred according to the criterion (1).

If  $\alpha_2 \leq 0,47$  then the “conditional” probability of the type I error probability  $\alpha_{2(1)}$  can also take values that are less, equal or greater than 0,47. Let us discuss cases  $\alpha_{2(1)} \leq 0,47$  and  $\alpha_{2(1)} > 0,47$ . The probability of decreasing the type I error according to the scenario (6) is estimated

by the following inequalities:  $\frac{1}{\alpha_{2(1)}} \geq 2,13$  and  $1 < \frac{1}{\alpha_{2(1)}} < 2,13$  respectively.

Let us discuss another case, when the type I error probability in the criterion (2) is  $\alpha_2 > 0,47$ .

Making similar reasoning, we get the same inequalities  $\frac{1}{\alpha_{2(1)}} \geq 2,13$  and  $1 < \frac{1}{\alpha_{2(1)}} < 2,13$ .

Hence, without loss of generality, we consider that type I error probability while decision-making according to the model (6) decreases up to 1,5—2,1 time.

### Conclusions and Path Forward

New two-criteria technics has been developed to forecast the gas-dynamic phenomena based on seismic-acoustic signals in rock mass. The probability of the forecast error has been estimated based on simulating different probability scenario. Due to probability estimation the best combination of criteria has been chosen. We proved that the prediction «not hazardous rock state» according to the developed criterion (10) has the probability of a type I error less than prediction according to the criterion (1).

The proposed two-criteria prediction technics with identifying situations «not hazardous rock state» according to (10) and «hazardous rock state» according to (11) has been incorporated in the hardware and software of seismic-acoustic complex at coal mines “Toretska”, “Tsentralna” (Ukraine, Donetsk region, Toretsk).

#### Acknowledgement

We are very grateful the staff of the Mining Enterprise "Toretskugol" for the help in statistical data gathering and testing the hardware-software acoustic complex.

#### References

- [1] Olovyanni, A.G. (2012). Meckanika gornyx porod. Modelirovaniye razrushenyi: monografiya. St. Petersburg: KOSTA. 279 p.
- [2] Deglin, B.M. (2004). Blesk i nishcheta prognozyrovaniya. *Ugol' Ukrainy*, 10 (574). <http://uran.donntu.org/~masters/2011/igg/velikoivanenko/library/stat2.htm>
- [3] Nikiforov, A.V. (2013). Kontsepsiya bezopasnogo vedeniya gornyx robot na plastskh, sklonnykh k gazodinamicheskim yavleniyam. *Ways and means of creating safe and healthy working conditions in coal mines. Collection of sci. works MakNII*. 2 (32), 44–57.
- [4] Ukraine coal industry standard SOU 10.100174088.011-2005 (2005). *Pravila vedennya girnychih robot na plastah, shilnyh do gazodinamicynyh yavisch (rozdily 6.3.4, 6.3.5)*. Kiev: Ministerstvo uholnoi promyshlennosti Ukrainy. 34–38.
- [5] Maslennikov, E. (2001). *Obosnovaniye parametrov prognoza vybrooopasnosti v ugolnykh shakhtakh na osnove analiza akusticheskogo signala*. Ph.D. NMU.
- [6] Golovko, Yu., Sdvyzhkova, E., & Klymenko, D. (2017). Skachkoobraznoe izmenenie dliny kriticheskoy treshchiny pri kolebatelnom vozdeystvii kak factor vzniknoveniya dinamicheskoho yavleniya. In *Forum hirnykiv* (pp. 135–144) Dnipropetrovsk: Natsionalnyi hirnychiy universytet.
- [7] Sdvyzhkova, O., Golovko, Yu., Dubytska, M., & Klymenko, D. (2016). Studying a crack initiation in terms of elastic oscillations in stress strain rock mass. *Mining of Mineral Deposits*, 10 (2), 72–77. <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.02.072>
- [8] Golovko, Yu., Sdvyzhkova, E., & Klymenko, D. (2017). Generalized criterion of crack initiation in terms of oscillations in stress strain rock mass. *Bulletin KrNU by M. Ostrogradsky*, 1(102), 41–49.
- [9] Golovko, Yu. (2017). Spectral parameters estimations of seismoacoustic signals for the current predict of gas-dynamic phenomena in mines. *Heotekhnichna Meckanika*, 134, 141–154.
- [10] Klymenko, D. (2018). *Zakonomernosti proyaviv i seismoakusticheskiy prohnos hazodinamicnyh yavishch pri vidpratsuvanni vuhilnyh plastiv*. Ph.D. National TU Dnipro Polytechnic.

### ЙМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПОМИЛОК СЕЙСМОАКУСТИЧНОГО ПРОГНОЗУ ПРИ ВИДОБУТКУ ВУГІЛЛЯ

Головко Ю.М., Клименко Д.В., Сдвижкова О.О.

#### Реферат

На даний час для прогнозування вибухів гірських порід у вугільних шахтах широко застосовується сейсмоакустичний метод. Тим не менше, середній рівень надійності цього методу становить близько 60–70 %. Імовірність помилок II роду («помилково негативні») при прогнозуванні становить близько 3 %. Але наявність помилок I роду («помилково позитивні») може бути значним. Ймовірність виникнення таких помилок слід зменшити, але в той же час збільшуються помилки II роду («помилково негативні»), що слід виключити.

Для вдосконалення техніки прогнозу була розроблена прогностична модель, що включає два показники: показник

$$K_{\text{в}} = \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}},$$

де  $A_{\text{в}}$  — високочастотна амплітуда в спектрі акустичного сигналу,  $A_{\text{н}}$  — низькочастотна амплітуда в спектрі акустичного сигналу, та показник

$$K_S = \frac{S_{\text{в}}}{S},$$

де  $S_{\text{в}}$  є площею спектра, що відповідає високочастотній компоненті спектру акустичного сигналу,  $S$  є загальна площа амплітудно-частотного спектра сигналу. Відповідно, слід визначити два критерії для виявлення небезпечної ситуації:  $K_{\text{в}} = \frac{A_{\text{в}}}{A_{\text{н}}} \geq K_{\text{в}}^*$  у проміжок часу  $\Delta t$  і більше,

та  $K_S = \frac{S_{\text{в}}}{S} \geq K_S^*$ , де  $K_{\text{в}}^*$  — критичне значення прогностичного показника  $K_{\text{в}}$ ,  $K_S^*$  є критичним значенням прогностичного показника  $K_S$ .

Відається перевага моделі з двома критеріями, що забезпечує зменшення ймовірності помилок першого роду («помилково позитивні»).

Запропоновані критерії (моделі прийняття рішень) застосовані при розробці шахтного сейсмоакустичного апаратно-програмного комплексу.

### Література

1. Оловянный А.Г. Механика горных пород. Моделирование разрушений: монография. СПб: ООО «Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2012. 280 с.
2. Блеск и нищета прогнозирования [Электронный ресурс]/ Деглин Б.М. Вугілля України, №10(574), 2004. Режим доступу: <http://uran.donntu.org/~masters/2011/igg/velikoivanenko/library/stat2.htm> (дата звернення 29.09.2019).
3. Никифоров А.В. Концепция безопасного ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям. *Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах*: зб. наук. пр. Макіївка: МакНДЦ, 2013. Вип. 2(32). С. 44–57.
4. СОУ 10.1.00174088.011-2005. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ (розділи 6.3.4, 6.3.5.). [Чинний від 2005-12-30]. К.: Мінвуглепром України, 2005. С. 34–38.
5. Масленников Е.В. Обоснование параметров прогноза выбросоопасности в угольных шахтах на основе анализа акустического сигнала: дис. ... канд. тех. наук: 05.15.11/ Днепропетровск: НГУ, 2001. 140 с.
6. Головка Ю.М., Сдвижкова О.О., Клименко Д.В. Стрибокподібна зміна довжини критичної тріщини при коливальному впливі як фактор виникнення динамічного явища. Форум гірників: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції, м. Дніпро, 4-7 жовтня 2017 р. Дніпро: НГУ, 2017. С. 135–144.
7. Sdvyzhkova O., Golovko Yu., Dubytska M., Klymenko D. Studying a crack initiation in terms of elastic oscillations in stress strain rock mass. *Mining of Mineral Deposits*. Dnipro: NMU, 2016. Vol. 10, Issue 2. P. 72–77. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15407/mining10.02.072> (дата звернення 29.09.2019).
8. Головка Ю.М., Сдвижкова О.О., Клименко Д.В. Узагальнена умова страгування тріщини, що ініційоване коливаннями в породному напружено-деформованому середовищі. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Кременчук, 2017. Вип. 1 (102). С. 41–49.
9. Головка Ю.Н. Оценка спектральных параметров сейсмоакустических сигналов при текущем прогнозе газодинамических явлений в шахтах. *Геотехническая механика*: Межведомственный сборник научных трудов. Дніпро: 2017. Вип. 134. С. 141–154.
10. Клименко Д.В. Закономірності проявів і сейсмоакустичний прогноз газодинамічних явищ при відпрацюванні вугільних пластів: дис. ... канд. тех. наук: 05.15.09/Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 184 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185052

UDC 538.911

**A. Dedoborz**, associate professor, [Mathematphysics@gmail.com](mailto:Mathematphysics@gmail.com)

**A. Kletskov**, assistant, [alex.kl87@i.ua](mailto:alex.kl87@i.ua)

Department of higher mathematics and physics of the Dnepr state agrarian-economic university

## ANALYSIS OF FASTENING METALS STRUCTURE BY CLUSTER MODEL ON THE BASIS OF RENGENODYFRACTION STUDIES DIAGNOSIS

*Worked computer program of design cluster structure of fusions to simple metals with a crystalline grate face - centered cube (FCC) and volume cube centred (VCC) of for comparison with experimental data of x-ray diffraction analysis.*

**Keyword:** *coordinating numbers; optimal clustersize.*

*Розроблена комп'ютерна програма моделювання кластерної структури розплавів простих металів з кристалічною решіткою гранецентрованою кубічною (ГЦК) та об'ємно-центрованою кубічною (ОЦК) для зіставлення з експериментальними даними рентгенодифракційного аналізу.*

**Ключові слова:** *координаційні числа; оптимальний розмір кластера.*

### Raising of problem

High speed the crystallization of metals is one of certificates of presence of well-organized, cluster structure of fusions to simple metals, that predetermines the necessity of interpretation data of neutron and x-ray researches on the basis of cluster model of structure of simple liquids.

### Analysis of the last researches and publications

Neutron and x-ray research of simple liquids and fusions is devote many works, including [2,3]. For realization the structural analysis of fusions to simple metals within the framework of cluster model drawn on the results of research of authors [1,4,5,6,7,8].

### Formulation of research purpose

The purpose of work is development of the computer program to design the cluster structure of fusions to simple metals with a crystalline grate face-centered cube (FCC) and cube (CCV) centred by volume of for comparison with experimental data of neutron and x-ray analysis, determination form and basic structural parameters of clusters — mean value of coordinating number, middle atom distance, optimal clustersize.

### Exposition of basic material

Interpretation of these diffraction researches on the basis of cluster model of structure of liquids requires implementation of complex of calculation tasks — from the choice of form of cluster to establishing a connection between the parameters of model and data of diffraction analysis. Corresponding calculations are represented in this work for clusters with the structures of FCC and CCV of grates.

The choice of form to the cluster was determined in accordance with principles of Kuri-Wulfa about a minimum of superficial energy to the crystal, which is in an equilibrium with the liquid and to corresponds principle Gallant according to which a crystal is limited to the atomic planes with the maximal closeness of atoms.

In FCC to the grate such are atomic planes  $\{110\}$ , from which the built clusters can be in a form: octahedron, tetrahedron, rhombohedron. Thus the first from adopted answers most attitude of volume toward the area of surface, id est is most credible. In CCV to the grate such are atomic planes  $\{\bar{1}0, \bar{1}0\bar{1}\bar{1}, 0\bar{1}\bar{1}, 101, 011, \bar{1}10, 1\bar{1}0, 10\bar{1}, 01\bar{1}, 0\bar{1}1, \bar{1}01\}$  from which the built clusters can be in form: bipyramid, prisms, threepyramid. And in this case the first from the adopted clusters answers most attitude of volume toward the area of surface, id est is most credible.

During interpretation of this radial function to distribution of atoms (RFDA) within the framework of cluster model it is necessary to define the methods of calculation of coordinating num-

bers on a cluster for their next middle on a standard and approximations with experimental RFDA. Unlike unfinished ideal to the crystal coordinating number, depends an atom which answers  $k$  — to the coordinating sphere on his position, that is why it is necessary to expect the  $AV$  coordinating number on a cluster for every coordination. Obviously, that it is possible a next way:

$$Z_k = \sum_i N_{ki} Z_{ki} / N(v), \quad (1)$$

where  $N_{ki}$  — number of atoms which have a coordinating number,  $Z_{ki}$  on every coordinating sphere,  $N(v)$  — number of atoms in cluster, when volume have  $v$  — atom.

In general case the number of atoms in a cluster is expressed by cube dependence on  $v$ :

$$N(v) = \alpha v^3 + \beta v^2 + \gamma v + c, \quad (2)$$

where  $\alpha, \beta, \gamma, c$  is determined for each of forms of clusters. Numbers:

$$Q_k(v) = \sum Z_{ki} N_{ki}(v) \quad (3)$$

also can be presented by analogical dependence

$$Q_k(v) = Z_{k\infty} (\alpha_k v^3 + \beta_k v^2 + \gamma_k v + \delta_k). \quad (4)$$

But, if in first case, parameters are determined relatively simply, then for being  $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \delta_k$  it is necessary to define the value of  $Q_k(v)$  for the different number of atoms in the rib of cluster ( $v$ ) for to all coordinating spheres which are used in calculations. For this purpose the algorithm of calculation of them was created by means of computer and after their determination the put task could be untied for all used forms of clusters.

As known, at consideration of diffraction on the limited object in a structural factor it is expedient to use the function of form  $V(x_p)$  [1]

$$a(S) = \sum_{-\infty}^{+\infty} V(x_p) \exp(iSx_p), \quad (5)$$

where  $x_p$  is rarius which connects some a central atom is arbitrarily chosen from  $P$  — by an atom,  $S$  is a factor of dispersion. Function of form

$$V(x_p) = \frac{1}{N} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sigma(x_m) \sigma(x_{m\pm p}), \quad (6)$$

where  $\sigma(x_{m\pm p})$  — function of Evald;

$$\sigma(x_{m+p}) = \begin{cases} 1, & x_{mp} \in V \\ 0, & x_{mp} \notin V \end{cases}$$

where  $V$  is a volume of some limited area.

Discrete forms were found  $V(x_p)$  for the areas of different form of structure of FCC for clusters as an octahedron and CCV as bipyramid and them continuous analogues. Also the continuous functions of form are found for all forms of clusters of structure of FCC and CCV. For them does not fold difficulties and being of characters of Fourier, for description of profile of diffraction peaks. For an octahedron general intensity:

$$i(S) = \frac{1}{d} \int_{-L}^L V(x) e^{iS_0 x} dx = 3 - \cos \alpha - 2\alpha^2 \sin \alpha, \quad (7)$$

*bipyramid* —

$$i(S) = \frac{L}{2d\alpha^4} [6\alpha^2 - \alpha^2 \cos \alpha - 2(\sin \alpha)^2 - 4\alpha \sin \alpha - 2 \cos \alpha + 2], \quad (8)$$

where  $\alpha = S \cdot L$ ,  $d$  is between plane distance,  $L$  is a characteristic clustersize for normals to family of beatings back planes.

The design program was carried out on such chart:

1. Introduction of experimental structural factor of a ( $S$ ), where  $S$  of — the change of wavevector at dispersion. The offered procedure is demonstrated on the example of diffraction researches of a ( $S$ ) fusion of copper (with the structure of FCC) at  $T =$  of 1393K [2] but to fusion to the rubidium (with the structure of CCV) at  $T =$  of 513K [3].

2. A calculation of RFDA is on the type of diffraction peak. The method of apodization [was thus used [4,5], what consists in the conduct of introduction of gravimetric function at being of functions of distribution atoms by the method of regularization to equalization of Tihonov in the diffraction tasks of research of macroscopically isotropic structures, which allows considerably to decrease oscillator component, related to the error of measuring and presence of top limit of size of change of wavevector, while in default of gravimetric function procedure of receipt results in blurring of peaks of function of distribution of atoms.

$G(r) = (4\pi\tau)^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} 4\pi x \rho(x) \exp\left(-\frac{(r-x)^2}{4\tau}\right) dx = 4\pi r \rho_0 + \frac{2}{\pi} \int_0^{S_m} S[a(S) - 1] e^{-\tau S^2} \sin Sr dr$ ,  
 where  $\tau$  — constant of apodization,  $\rho(x)$  is a local atomic closeness. Thus

$$4\pi r \rho(r) = \sum_k \frac{z_k}{r_{k\sqrt{2\pi\sigma^2}}} \exp\left(-\frac{(r-r_k)^2}{2\sigma^2}\right).$$

In right part of equalization  $G_{\text{експ}}$  can be found minimization of quadratic form

$$Q = \int_{r_1}^{r_2} \{G(r) - G_e(r)\}^2 dr. \quad (9)$$

3. The system of normal transcendent equalizations, which got untied by the method of the gradient lowering, turned out.

The initial values of parameters of  $z_k, r_k, \sigma_k$  coming from supposition about the type of near order accordingly position of diffraction peak.  $\sigma_k$  — on speed of distribution of sound and nearest between atom distances. The weekend of  $z_k$  was determined by the estimation of middle sizes of efficiency in fusions and on her form. Choosing the that or other form of area of efficiency determine such values her middle sizes, that deviation of theoretical type of diffraction peak from experimental was minimum.

4. A type was approximated by expression

$$i(S) = \frac{B}{d_{nk1}} \int_0^{\infty} g(L) dL \int_{-L}^L V\left(\left|\frac{x}{L}\right|\right) \cos Sx dx, \quad (10)$$

where model function of distribution of clusters for to the sizes

$$g(L) = AL^{\frac{3n}{2}} \exp(-\beta L^m). \quad (11)$$

Coefficient  $A$  is determined from the condition of norms setting

$$\int_0^{\infty} g(L) dL = 1,$$

$m = 2-3$  (best approximation  $m = 3, n = 1$ ).

Minimization (9) is determine  $z_k, r_k, \sigma_k$  are the specified values for 30 coordinating spheres.

5. The result of approximation is determination of mean value of coordinating number, middle between atom distance, optimal clustersize.

The worked out program of design allows to conduct research of changes of structural parameters in the wide interval of temperatures.

So in works on research of physical properties [6,7,8] it was shown that the change of structure of near coordination in fusions of alkaline metals (Rb, Cs) with a temperature takes place not droingly, but place is taken saltatory at certain temperatures or in the very narrow interval of temperatures.

These changes correlate with the anomalous phenomena on dependences of viscosity and closeness on a temperature. Yes, for fusions of rubidium it takes place in the interval of temperatures 250°—300°C.

In this work research of temperature dependences of parameters of structure of fusions of rubidium is conducted in the interval of temperatures from near to the melting-point –40°C ( $t_{\text{mel}}^{\circ} = 38,9^{\circ}\text{C}$ ), to 400°C. Data of diffraction researches were used for the brought object [over 3]. For a design the form of cluster was used as bipyramid. The mean values of between atom distance, optimal clustersizes, middle distances, were determined between clusters.

In the interval of temperatures 250°—300°C was observed saltatory changes of afore-named parameters. The special attention is deserved by dependence of optimal clustersize ( $L_{\text{opt}}$ ) on a temperature ( $T$ ) which with high exactness of approximation answers dependence —  $L_{\text{opt}} = A \exp\left(\frac{\Delta E}{RT}\right)$

Energy of activating  $\Delta E$  it follows to interpret with the increase of the combined superficial energy of clusters the sizes of which diminish with the increase of temperature. In the afore-named interval of temperatures there was a change  $\Delta E$  from 1,537  $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  in the interval of temperatures 40°—240°C, to 2,493  $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  in the interval of temperatures 300°—400°C. It is the certificate of phase transition of II of family, which can be bound to the change of form to the cluster, for example, of passing to the varieties of prism, bipyramids which are answered by less attitude of volume toward the area of surface, id est substantially greater superficial energy. But it requires the detailed analysis: implementation of design for the different forms of clusters, peculiar to the structure of FCC in different tempera-



ture intervals. In addition, extrapolation of dependence of  $L_{\text{opt}}(T)$  pithily melting gives a value medium-sized of cluster over 14 angstrom for the considered case of bipyramid. If to interpret the warmth of crystallization —  $2,31 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$  as the disengaged combined superficial energy of clusters, there is possibility to find her dependence on the sizes of clusters and from a temperature, and, finally, to estimate the size of between atom potential which is a separate task.

These changes correlate with the anomalous phenomena on dependences of viscosity and closeness on a temperature. Yes, for fusions of rubidium it takes place in the interval of temperatures  $250^{\circ}\text{—}300^{\circ}\text{C}$ .

### Conclusions

The worked out computer program provided exactness of approximation of 0,05 %. For the brought objects [over 2] it is got:  $AV$  between atom distance —  $6,677 \text{ \AA}$ , optimal clustersize —  $18,597 \text{ \AA}$ ,  $AV$  coordinating number — 0,962,  $AV$  distance between clusters —  $0,474 \text{ \AA}$ , for objects [3] it is got:  $AV$  between atom distance —  $5,755 \text{ \AA}$ , optimal clustersize —  $12,756 \text{ \AA}$ ,  $AV$  coordinating number — 1,325,  $AV$  distance between clusters —  $0,518 \text{ \AA}$ . research of temperature dependences of parameters of structure of fusions of rubidium is Conducted in the interval of temperatures from near to the melting-point —  $40^{\circ}\text{C}$  ( $t^{\circ}_{\text{mel}} = 38,9^{\circ}\text{C}$ ), to  $400^{\circ}\text{C}$ .

### References

- [1] Hinie A. (1961) Renthenografiia kristalov. Teoriia i praktika. [Rentgenografic of crystals. Theory and practice] Moskva. (in Russian)
- [2] Elder O.Y., Etpresser E., Kunsch B., Stiller H. and Suda M. (1980). The Structure factor of liquid copper at 1393 K, 1833K. — J. Phys.F. Metall Phys. Vol 10. 183p. (in English)
- [3] Waseda Y. and Suzuki K. (1972). Physics state solid. (B). Vol.49. 643p. (in English)
- [4] Gulivets N.I., Bobyl A.V., Dedoborets A.Y., Peleshenko B.I. (1997) Funktsiia raspredeleniia atomov makroskopicheski izotropnykh obektov v difraktsionnykh issledovaniiax []. Pisma v ZhTF — Letters to Jornal of theoretic Physics, 23(5), 21–26.
- [5] Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. (1979) Metody recheniia nekorektnikh zadach [] Moskva: Nauka (in Russian)
- [6] Gingrich N.S., Heaton L.P., J. Chem. (1961) Physics. Vol. 34. 873 p. (in English)
- [7] Black R., Suck J.B., Glaser W. et al (1976) Ber. Bunsen-Gesellschaft. Bd. 80.8.— S. 718 (in Germany)
- [8] Zei M.S. (1983) Rhys. Rev. A. Vol. 27. Numb. 1. 515 p. (in English)

## АНАЛІЗ СТРУКТУРИ РОЗПЛАВІВ ПРОСТИХ МЕТАЛІВ У РАМКАХ КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ НА ОСНОВІ ДАНИХ РЕНТГЕНОДИФРАКЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дідоборець О.Й., Клєцков О.М.

### Реферат

Метою роботи є розробка комп'ютерної програми моделювання кластерної структури розплавів простих металів з кристалічною решіткою гранецентрованою кубічною (ГЦК) та об'ємно центрованою кубічною для зіставлення з експериментальними даними рентгенодифракційного аналізу.

Розрахунок координаційних чисел по кластеру для їх наступного усереднювання за зразком і зіставлення (апроксимації) з експериментальною радіальною функцією розподілу атомів (РФА). При цьому вибір форми кластера здійснювався відповідно до принципу Кюрі-Вульфа та Браве — про мінімум поверхневої енергії кристала, який знаходиться в рівновазі зі своєю рідиною, і тим, що кристал обмежується атомними площинами з максимальною щільністю атомів. Для ГЦК грат їм відповідають кластери у формі: октаедра, тетраедра, ромбоедра, причому пер-

шою з названих відповідає найбільше відношення об'єму до площі поверхні, тобто вона є найбільш достовірною.

Для вказаних вище форм кластерів були визначені дискретні функції форми і їх безперервні аналоги у різних напрямках трансляцій.

По отриманих функціях були певні Фур'є-образи (інтенсивності) для опису профілів дифракційних піків для випадку октаедра. Використанням отриманих залежностей розроблена комп'ютерна програма моделювання кластерної структури, яка полягала в апроксимації експериментальних даних рентгенодифракційних досліджень розплавів міді теоретичною моделлю. Результатами апроксимації є: визначення середнього значення координаційного числа, середньої міжатомної відстані, оптимального розміру кластера, середньої відстані між кластерами. Отримані дані для міді при температурі 1393 К мають наступні значення: середня міжатомна відстань —  $6,677 \text{ \AA}$ , оптимальний розмір кластера —  $18,597 \text{ \AA}$ , середнє координаційне число — 0,962, середня відстань між кластерами —  $0,474 \text{ \AA}$ .

Дані для рубідія при температурі 1393 К мають наступні значення: середня міжатомна відстань —  $5,755 \text{ \AA}$ , оптимальний розмір кластера —  $12,756 \text{ \AA}$ , середнє координаційне число — 1,325, середня відстань між кластерами —  $0,518 \text{ \AA}$ .

### Література

1. Гинье А. Рентгенография кристаллов. Теория и практика: монография. М.: Изд. Наука. 1961. 500с.
2. Elder O.Y., Etpresser E., Kunsch B., Stiller H. and Suda M. The Structure factor of liquid copper at 1393 K, 1833K. Journal of Physics.F. Metall Physics. 1980. Vol 10. 183p.
3. Waseda Y. and Suzuki K. Physics solid state. 1972.Vol.49(B). 643p.
4. Гуливец Н.И., А.В. Бобыль, А.И.Дедоборец, Б.И.Пелешенко. Функция распределения атомов макроскопически изотропных объектов в дифракционных исследованиях. Письма в ЖТФ. 1997. № 23(5). С.21–26.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.:Изд. Наука. 1979. 288 с.
6. Gingrich N.S., Heaton L.P. Journal of Chemical Physics. 1961. Vol. 34. 873p.
7. Black R., Suck J.B., Glaser W. Journal Berlin Bunsen-Gesellschaft. 1976. №. 80.8. p.718
8. Zei M.S. Physics Review American. 1983.Vol. 27. №. 1. 515 p.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185057

UDC 621.771.014

**O.P. Maksymenko**<sup>1</sup>, Doctor of Engineering sciences, full professor, Head of the Department of Metal Processing

**V.M. Samokhval**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), docent, associate professor, volsa-mokhval@gmail.com

**A.Y. Orobtssev**<sup>2</sup>, Candidate of Engineering Sciences (Ph. D), Head of Technical Department

**K.K. Marchenko**<sup>1</sup>, Postgraduate Student, marchenokk@gmail.com

<sup>1</sup>Dniprovsk State Technical University, Kamianske, Ukraine

<sup>2</sup>Dneprovsky Integrated Iron and Steel Works, Kamianske, Ukraine

### MODELING THE INFLUENCE OF ROLL WEAR ON THE ROLLING PARAMETERS IN A WIRE ROD BLOCK

*A mathematical model of the rolling process in a wire rod block with the determination of the average resultant force of the internal longitudinal forces of the metal in the roll bite deformation is proposed, as a criterion for the rolling process stability, and the analysis of the limits of the process self-regulation from perturbations arising from the wear of the rolls of one of the modules. The influence of the wear of the gauge roll of one of the modules on the rolling parameters in all subsequent modules is revealed, which is manifested in the gradual increase of tension stresses between the modules. Such an increase in tension within the self-regulating equilibrium conditions in the deformation roll bite of the fifth and all subsequent modules leads to a decrease in the rolling moments in these modules and in general for the block. The model allows to determine the maximum wear of the calibers, which maintains the stability of the rolling process, which is estimated by the value of the average resulting longitudinal forces.*

**Keywords:** roll wear; interstand tension; process stability; torque rolling; average resultant longitudinal forces.

*Запропонована математична модель процесу прокатування в дротовому блоці з визначенням середньої результуючої сили внутрішніх подовжніх сил металу в осередку деформації, в якості критерію сталості процесу прокатування, та виконано аналіз меж саморегулювання процесу від збурювань, що виникають від зношення валків одного з модулів. Виявлено вплив зношення калібру одного з модулів на параметри прокатування у всіх наступних модулях, який проявляється в поступовому збільшенні напружень натягіння між модулями. Таке збільшення натягіння в межах саморегулювання умов рівноваги в осередках деформації п'ятого і всіх наступних модулів призводить до зменшення моментів прокатування в цих модулях і в цілому для блоку. Модель дозволяє визначити граничний знос калібрів, за якого зберігається сталість процесу прокатування, яка оцінюється за значенням середньої результуючої подовжніх сил.*

**Ключові слова:** знос валків; міжклітьове натягіння; сталість процесу; момент прокатування; середня результуюча подовжніх сил.

#### Formulation of the problem

The development of technology and the improvement of equipment for the production of wire rod allowed to improve the geometric indicators of quality, increase productivity and improve the mechanical properties of rolled products. The results of numerous theoretical and experimental studies of the rolling process in a wire block are given in [1—3]. In these works, the results of the analysis of the geometry and kinematics of the rolling process of the wire rod, the temperature and force conditions in the deformation zone, taking into account the mass forces, are presented.

The modern wire rod block is a 10-module unit, the continuous rolling process in which is carried out with a minimum tension at a speed of up to 120 m/s. Despite the fact that the rolls of the block are made of high-strength carbide material, during the campaign, the grooves of gauges are subject to significant wear [4, 5]. Given the high cost of such rolls, their wear and downtime associated with change rolls, negatively affect the productivity and cost of production. In addition, as the rolls wear,

the shape of the groove gradually changes, which leads to a redistribution of the reductions and the corresponding deviations of other technological parameters. In the conditions of wire rod blocks having a group drive, such deviations can reach critical values, leading to violations of the stability of the rolling process.

### Analysis of recent research and publications

It is well known that in the deformation zone during rolling, external disturbances, to a certain extent, are compensated by the redistribution of friction forces. Such a redistribution of friction forces manifests itself in a change in the position of the neutral section of the deformation roll bite, which is numerically determined through the angle  $\gamma$ . The dependences of the angle  $\gamma$ , as a regulator of the equilibrium conditions in the deformation zone, on the rolling parameters are considered in detail in [6].

To assess the degree of influence of external influences on the equilibrium conditions in the deformation zone, the average resulting longitudinal force index proposed in [7—9] can be used. The rolling process model using this indicator is based on using dependencies

$$Q_{cp,np} = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_0^{\alpha} Q_{x,np} d\varphi; \quad (1)$$

$$Q_{x,np} = \sigma_x \cdot h_x \cdot b_x, \quad (2)$$

or in dimensionless form

$$Q_{cp,np}^* = \frac{1}{\alpha} \cdot \int_0^{\alpha} Q_{x,np}^* d\varphi;$$

$$Q_{x,np}^* = \frac{Q_{x,np}}{2K_{cp} \cdot R \cdot b_x} = \frac{\sigma_x}{2K_{cp}} \left( \frac{h_1}{R} + \varphi^2 \right),$$

where  $\alpha$  — is the angle of contact (angle of bite) in the steady state process;  $Q_{x,np}$  — current longitudinal force from plasticity stresses of the deformable body in the deformation zone;  $2K_{cp}$  — average deformation resistance;  $\varphi$  — current capture angle along the deformation zone;  $h_x$  и  $b_x$  — current thickness and width of the roll along the deformation zone;  $R_k$  — roll radius.

The average resultant force  $Q_{cp,np}$  is the resistance force of the metal to deformation, prevents the longitudinal flow of the metal and, therefore, cannot contribute to the rolling process. The direction of the vector of this force is opposite to the movement of the metal in the focus. Accordingly, as shown in [7, 8], at negative values of this force  $Q_{cp,np} < 0$ , the rolling process remains stable. When  $Q_{cp,np} = 0$  there are extreme rolling conditions. If this force takes positive values, the rolling process is impossible.

The proposed stability criterion for the rolling process is more stringent in comparison with the well-known condition  $\gamma = 0$ .

### Research goal statement

The aim of the work is to simulate rolling in a wire block using the average resulting longitudinal forces as a criterion for the stability of the process and analysis of the limits of the process self-regulation from disturbances introduced by the wear of the rolls.

### Statement of the main material

When developing a model of the rolling process in a wire block, we proceeded from the solution of the differential equilibrium equation of T. Karman using the friction model

$$t_x = f_y \cdot p_x,$$

where  $f_y$  — steady-state friction coefficient;  $p_x$  — current values of metal pressure on rolls.

To determine the rolling parameters in gauges, the model provides for the use of the corresponding strip method and the law of constancy of second volumes. A feature of the model is the account of the tensions arising between the unit modules.

The sequence of calculations in the developed model includes the following steps. First, we determine the sizes of the corresponding strip for each of the passes, along which we calculate the usual geometric and deformation parameters.

Kinematic parameters are determined taking into account the tension between the modules. In this case, taking into account the recommendations of the studies [2], the specific tension for the first pass is assigned as minimum.

For the first pass, the width of the workpiece on exit from the roll bite is calculated according to the method described in [10], setting a certain value of the coefficient of friction. To a first approximation, a value of 0.26 was used. Then we determine the forward slip by the known dependence

$$S = \frac{R_k \cdot \gamma^2}{h_1} + \frac{\frac{\sigma_1}{2K_{cp}} \cdot \frac{h_1}{R_k} \cdot \frac{b_1}{b_{cp}} - \frac{\sigma_0}{2K_{cp}} \cdot \frac{h_0}{R_k} \cdot \frac{b_0}{b_{cp}}}{4 \cdot \frac{P_{cp}}{2K_{cp}} \cdot f_y}, \quad (3)$$

where  $\gamma$  — neutral plane angle;  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  — front (exit) and rear (entry, back) specific tension of the roll (as the ratio of the tension force to the cross-sectional area of the workpiece);  $b_{cp}$  — average width workpiece over the deformation zone.

The second term in dependence (3), taking into account the influence of front and rear tension, was denoted as  $\varphi(q_0, q_1)$ .

Using the forward slip value in the first pass, we determine the velocity of metal exit from the deformation zone  $V_1$  and the rolling constant  $C = h_1 \cdot b_1 \cdot V_1$ . The rolling constant, determined by the parameters of the first pass, remains unchanged for all the others.

Further, using pressure distribution diagrams  $\frac{P_x}{2K_{cp}}$  and plasticity conditions, we obtain the

values of normal longitudinal stresses  $q = \frac{\sigma_x}{2K_{cp}}$  and the average resulting longitudinal force of the

plastically deformable metal  $Q_{x\_np}^*$ .

For the second pass, using the iterative procedure, the values of the metal exit velocity from the rolls and the cross-sectional area are selected that satisfy the rolling constant. In each of the iterations, the definition of the width of the workpiece at the exit, the front tension, the forward slip, and other intermediate parameters is provided. Similarly, we perform parameter calculations for all subsequent modules of the wire rod block.

We use the obtained rolling parameters for the block modules to calculate the rolling moment in the usual and dimensionless form  $M_{np}^* = M_{np} \cdot \frac{1}{2K_{cp} \cdot R_k^2 \cdot b_{cp}}$ . A condition check  $B_k \geq b_1$  is also

performed to prevent overflow of gauge.

Using the developed model, we performed parameter calculations for the real case of rolling a wire rod with a diameter of 5.5 mm in the conditions of mill 400/200 of the Dnieper Metallurgical Plant. The main parameters of rolling according to the existing technology are shown in table 1. In this case, the friction coefficient was taken  $f_y = 0.26$ .

The calculated rolling parameters are summarized in tabl. 2.

As follows from the data obtained, the rolling process is carried out with minimal tension between the modules and is characterized by sufficient stability. This is confirmed by the calculated values of the average resulting longitudinal force — negative values of approximately the same order were obtained for all modules, from  $-0.009$  to  $-0.016$ .

To analyze the possible limits of self-regulation of the process from disturbances introduced by the wear of the rolls, the rolling parameters were calculated for the case when there is wear in one of the modules that exceeds the wear on the other modules. From the results of measuring the actual

wear of several sets of rolls of the block, it was found that the maximum wear is observed in the fifth module. During the campaign, "draft" modules gauges (No. 1 — No. 7) provide rolling of approximately 2500 tons of wire rod. Moreover, the maximum wear of the fifth module rolls is 1.0—1.2 mm. For other "draft" modules, the amount of wear varies between 0.4—0.6 mm. Therefore, using the developed model of the rolling process in the wire block, we performed the simulation of the perturbing effect of the wear of the rolls of the fifth module on the rolling parameters of the entire block.

Table 1. Rolling parameters in a wire block of wire rod with a diameter of 5.5 mm according to existing technology and the dimensions of the corresponding strip

№ module	Gauge Parameters, mm				Workpiece Parameters				Dimensions of the corresponding strip				
	width	groove depth	gap	radius	height	width	cross-sectional area	elongation coef.	thickness		corresponding reduction $\Delta h_{np}$	width	
	$B_k$	$h_{np}$	$g$	$R_k$	$h_i$	$b_i$	$A_i$	$\lambda$	input $h_{0np}$	output $h_{1np}$		input $b_{0np}$	output $b_{1np}$
0					17,3	17,3	234,9						
1	23,65	4,6	1,8	102,6	11	21,05	181,8	1,2924	15,33	9,75	5,58	15,33	18,65
2	13,83	6,14	1,5	101,7	13,78	13,78	149	1,2202	18,65	12,21	6,45	9,75	12,21
3	18,89	3,5	2,1	103,3	9,1	16,57	118,4	1,2585	12,21	8,06	4,14	12,21	14,68
4	11,45	4,95	1,06	102,5	10,96	10,96	94,37	1,2544	14,68	9,72	4,97	8,06	9,71
5	16,85	2,7	1,9	103,9	6,5	14,43	73,62	1,2819	9,71	5,76	3,95	9,71	12,78
6	8,97	3,7	1,29	103,3	8,69	8,69	59,25	1,2425	12,78	7,7	5,09	5,76	7,7
7	13,56	2,1	1,9	104,3	6,1	9,75	46,7	1,2687	7,7	5,41	2,29	7,7	8,64
8	7,27	2,92	1,01	103,9	6,85	6,85	36,84	1,2676	8,64	6,07	2,57	5,41	6,07
9	10,24	1,6	1,3	104,7	4,5	8,31	29,34	1,2556	6,07	3,99	2,08	6,07	7,36
10	5,76	2,18	1,16	104,4	5,52	5,52	23,92	1,2266	7,36	4,89	2,47	3,99	4,89

Table 2. Design parameters for the developed model

Calculation parameters													
№	$b_{cp}$	$\alpha$	$\gamma$	$R\gamma^2/h_1$	$\varphi(q_0q_1)$	$S$	$V_0$	$V_B$	$V_1$	$q_i$	$Q_{cp}^*$	$p_{cp}/2k$	$M_{np}$
1	16,99	0,233	0,0655	0,0452	0,0022	0,047	10,48	12,93	13,54	0,025	-0,016	1,1517	0,061
2	10,98	0,252	0,0623	0,0323	-0,0007	0,032	13,54	16,01	16,52	0,025	-0,011	1,0856	0,072
3	13,44	0,200	0,0597	0,0457	0,0013	0,047	16,52	19,86	20,79	0,05	-0,014	1,1696	0,048
4	8,89	0,220	0,0617	0,0402	0,0002	0,04	20,79	25,08	26,08	0,065	-0,009	1,0914	0,054
5	11,25	0,195	0,0569	0,0585	-0,0014	0,057	26,08	31,63	33,43	0,055	-0,012	1,1975	0,049
6	6,73	0,222	0,0562	0,0424	-0,0045	0,038	33,43	40,02	41,54	0,005	-0,011	1,1460	0,064
7	8,17	0,148	0,0537	0,0556	0,0012	0,057	41,54	49,87	52,71	0,035	-0,016	1,2738	0,026
8	5,74	0,157	0,0567	0,055	0,0023	0,057	52,71	63,21	66,81	0,09	-0,013	1,1915	0,027
9	6,72	0,141	0,0463	0,0564	-0,0027	0,054	66,81	79,60	83,90	0,025	-0,012	1,2940	0,032
10	4,44	0,154	0,0515	0,0567	-0,0012	0,056	83,9	98,00	103,49	0	-0,016	1,3085	0,034
												$\Sigma=$	0,467

The wear value was modeled at the levels of 0.4 mm, 0.6 mm and 0.8 mm, assigning the thickness of the roll at the exit of the fifth module, respectively 6.9 mm, 7.1 mm and 7.3 mm. The calculation results, in comparison with the parameters of the basic schedule according to the existing technology, are shown in Fig. 1—4.

Fig. 1 shows the dynamics of the change in the front specific tension as the wear in the module 5 changes. From the data obtained it follows that the change in the gauge of the 5th module leads to an increasing tension increase for all subsequent modules. In this case, as the wear increases, the tension also increases. As a result, when wear the gauge of the 5th module is 0.8 mm, the maximum value of the front tension is observed for the ninth module. Such features of tension change are associated with self-regulation processes in each of the deformation zones for module 5 and all subsequent ones to maintain a balance of forces and ensure that the conditions for the constancy of second volumes are satisfied.

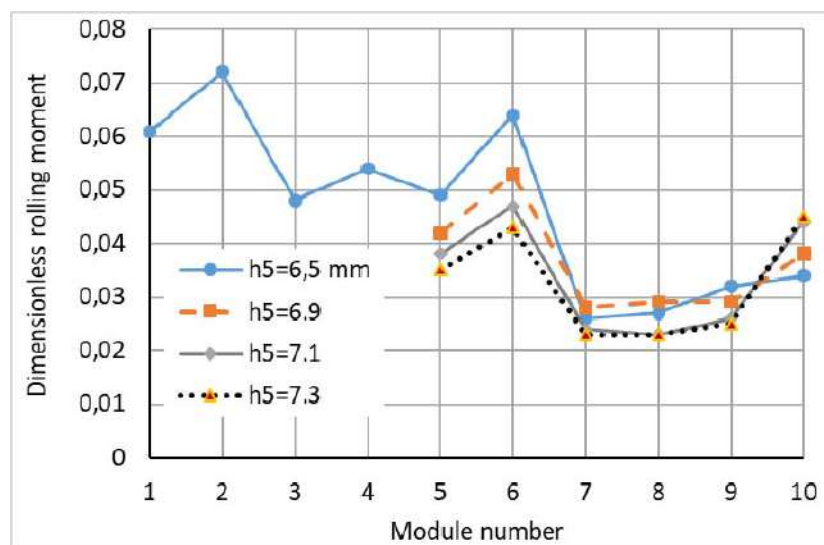


Fig. 1. Dependences of the distribution of the front specific tension on the block modules when the wear in the gauge of the fifth module changes

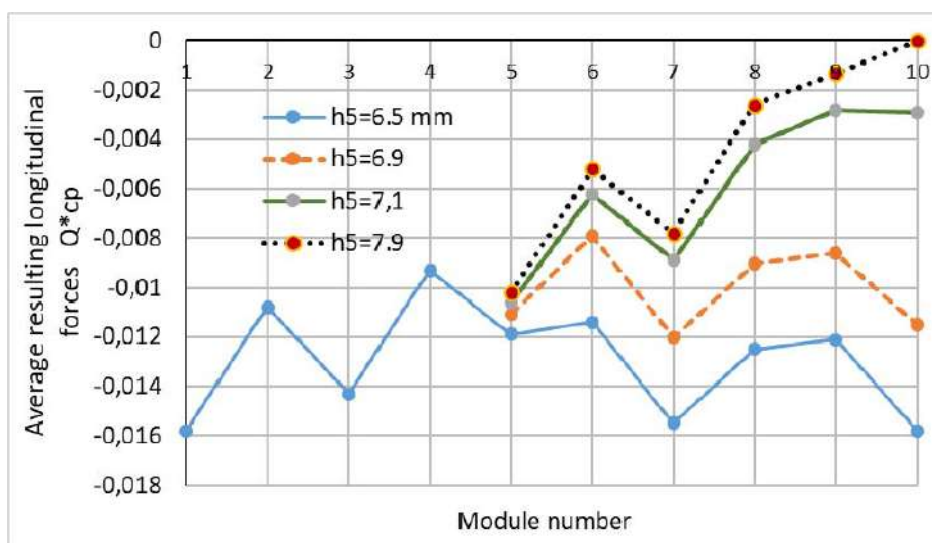


Fig. 2. The effect of wear of the rolls of the fifth module on the average resulting longitudinal forces of plastically deformable metal

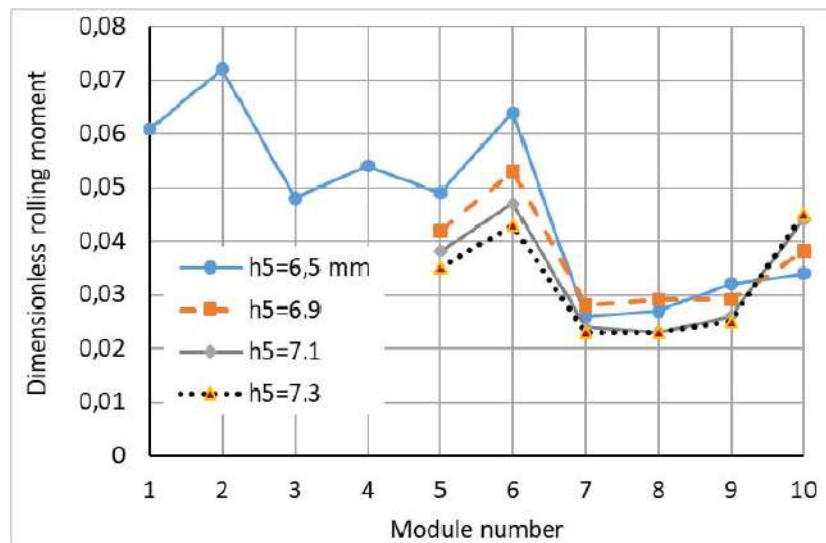


Fig. 3. Change in dimensionless rolling moment depending on the wear of the rolls of the 5th module

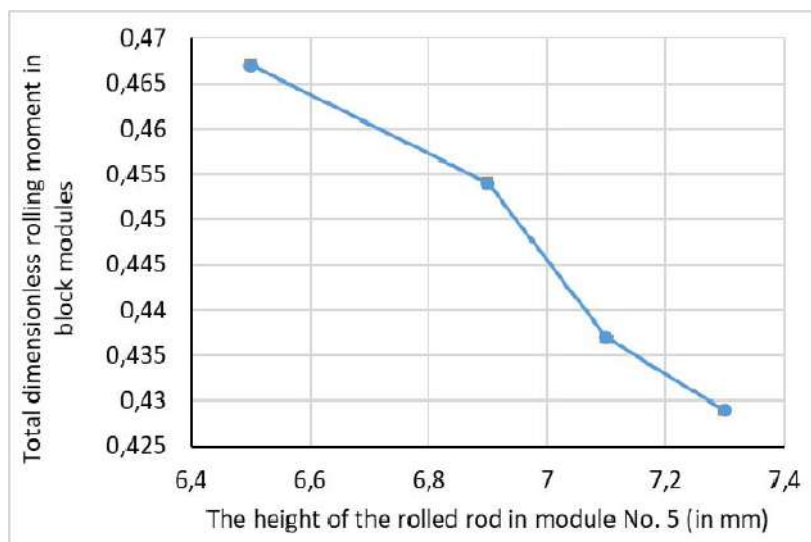


Fig. 4. The effect of roll wear on the 5th module on the total rolling moment

From an analysis of the dynamics of changes in the average resulting longitudinal forces of a plastically deformable body (Fig. 2), it follows that with increasing wear of the rolls of the 5th module, the value of this parameter decreases in absolute value, both for the 5th module and for all subsequent ones. Moreover, such a decrease has an increasing character for each subsequent module. As a result, when the caliber of the 5th module is worn down by 0.8 mm, the force value in  $Q_{x\_np}^*$  the tenth module is obtained equal to zero, which indicates the achievement of the limit rolling conditions when slippage or stopping the rolling process are possible. Therefore, to prevent slippage, that is, violation of the stability of the rolling process, it is necessary to eliminate the causes that lead to loss of stability of the process. At the same time, actions to prevent or eliminate slippage should not be taken in the 10th module, but in the 5th. The most effective action to maintain the stability of the process will be the transshipment of the rolls of the block due to the achievement of the maximum allowable wear of the gauge of the 5th module.



Given that for the take value wear of 0.8 mm, which corresponds to the average wear around the perimeter of the caliber, the maximum wear for the most worn sections can reach somewhat larger values. This is confirmed by the results of measurements of actual gauge wear, according to which the maximum gauge wear of the 5th module, as mentioned earlier, reaches 1.0—1.2 mm. Thus, the theoretically substantiated, according to the criterion of the average resultant longitudinal forces, the need for change roll to the achievement of the maximum allowable wear, is confirmed by practical data.

According to the data shown in Figure 3, as wear in the 5th gauge increases and a corresponding increase in tension in subsequent modules leads to a decrease in rolling moment. The most significant torque reduction was obtained for modules 5 and 6. For subsequent modules, the effect of wear on the moment is weakened.

The exception is module No. 10, where the opposite nature of the moment change is obtained. This is due to the characteristics of the distribution of tension with increasing wear. The most significant increase in forward tension occurs in module No. 9, but for module No. 10, this tension is rearward. With a constant forward tension for module No. 10 equal to zero, an increase in the rear tension inevitably leads to a corresponding increase in torque.

It is important to note that by reducing the rolling moment in modules No. 5 — No. 9, the total rolling moment of the block is reduced. The dependence of the change in the total rolling moment in the block on gauge wear in the 5th module is shown in Figure 4. This effect is manifested due to an increase in tension as the wear increases.

### Conclusions

A model of the rolling process in a wire block has been developed, the distinguishing feature of which is the ability to determine the average resulting longitudinal forces of plastically deformable metal, which is used as a criterion for assessing the stability of the rolling process.

The effect of gauge wear on one of the module modules on rolling parameters in subsequent modules, which occurs as a result of self-regulation of equilibrium conditions in the deformation zones of these modules, is established. Most significantly, this effect manifests itself in the distribution of tension, which in turn leads to a decrease in the rolling moment in subsequent modules and the total rolling moment in the block.

The model allows you to determine the maximum allowable value of wear of the rolls according to the criterion of the average resulting longitudinal forces of the plastically deformable body, at which the stability of the rolling process in the wire rod block is maintained.

### References

- [1] Ivodytov A. N. & Horbanev A. A. (1989) *Razrabotka i osvoenye tehnolohyy proyzvodstva vysokokachestvennoi katanky* [Development and mastering of high quality wire rod production technology]. M. : Metallurhyia. [in Russian].
- [2] Horbanev A. A., Zhuchkov S. M., Fylyppov V. V., Tymoshpolskyi V. I., Steblov A. B., Yunakov A. M., Tyshchenko V. A. (2003) *Teoretycheskiye i tehnolohycheskiye osnovy vysokoskorostnoi prokatky katanky* [Theoretical and technological foundations of high-speed rolling wire rod]. Mynsk : Vysshaya shkola. [in Russian].
- [3] Kuhushyn A. A., Popov Yu. A. (1982) *Vysokoskorostnaia prokatka katanky* [High speed rolling wire rod]. M. : Metallurhyia. [in Russian].
- [4] Maksymenko O. P., Marchenko K. K. (2018) *Metodyka y rezultaty issledovaniya iznosa kalybrov valkov pry prokatke katanky v provolochnom bloke* [Methods and results of the study of wear gauge rolls when rolling rod in a wire block]. *Metallurhycheskaia i hornorudnaia promyshlennost*. [in Russian].
- [5] Byon S. V., Lee Y. (2008) A study of roll gap adjustment due to roll wear in groove rolling: experiment and modeling. *JEM1065, Proc. JMechE Vol. 222 Part B: Engineering Manufacture*.
- [6] Vydrin V. N. (1960) *Dinamyka prokatnykh stanov* [Rolling mill dynamics]. Sverdlovsk : Metallurhyzdat. [in Russian].
- [7] Maksymenko O. P., Loboiko D. Y., Yzmailova M. K. (2016) *Prodolnaia ustoichyvost polosy v valkakh s analizom kontaknykh uslovyi* [Longitudinal stability of the strip in the rolls with the

- analysis of contact conditions]. *Sbornyk nauchnykh robot Dneprodzerzhynskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta (Tekhnicheskyye nauky)*. – Dneprodzerzhynsk: DDTU. [in Russian].
- [8] Maksymenko O. P., Yzmailova M. K., Loboiko D. Y. (2015) Analiz prodolnoi ustoichyvosti protsessa prokatky s uchetom vnutrennykh sil i rezhyma natiazheni polosy [Analysis of the longitudinal stability of the rolling process, taking into account internal forces and strip tension mode]. *Metallurhycheskaia i hornorudnaia promyshlennost*. [in Russian].
- [9] Maksymenko O. P., Loboiko D. Y., Romaniuk R. Ya. (2013) Analiz sylovoho vzaymodeistviya v ochahе deformatsyy pry prokatke [Analysis of force interaction in the deformation zone during rolling]. *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*. [in Russian].
- [10] Hrudev A. A. (1988) *Teoryia prokatky [Rolling theory]*. M. : Metallurhiya. [in Russian].

## МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗНОСУ ВАЛКІВ НА ПАРАМЕТРИ ПРОКАТУВАННЯ В ДРОТОВОМУ БЛОЦІ

Максименко О.П., Самохвал В.М., Оробцев А.Ю., Марченко К.К.

### Реферат

Дослідження впливу зносу валків на параметри прокатування були і залишаються актуальними для всіх типів станів. Однак, для дротових блоків такі дослідження особливо актуальні, як з огляду на зменшення зносу валків, так і для забезпечення сталості процесу прокатування.

Метою роботи є моделювання прокатування в дротовому блоці з використанням середньої результуючої подовжніх сил пластично деформованого тіла в якості критерію сталості процесу та аналіз меж саморегулювання процесу при збуреннях, викликаних зносом валків.

Розроблена математична модель процесу прокатування в дротовому блоці, з використанням середньої результуючої подовжніх сил в якості критерію сталості процесу, дозволила виконати аналіз меж саморегулювання процесу при збуреннях, які виникають від зносу валків одного з модулів блоку. На основі практичних даних виконано моделювання впливу зносу валків модуля №5. Величину зносу варіювали на чотирьох рівнях, які відповідали реальним значенням, отриманим для одного з комплектів валків блоку. Виявлено вплив зносу калібрів валків 5-го модуля на параметри прокатування в наступних модулях, що проявляється в наростаючому збільшенні натяжіння розкату між модулями та збільшенні середньої результуючої подовжніх сил. Збільшення натяжіння в межах саморегулювання умов рівноваги в осередках деформування модулю, що розглядається, та всіх наступних, призводить до зменшення моментів прокатування для цих модулів та в цілому для блоку.

Модель дозволяє визначити граничний знос калібрів валків, до якого зберігається сталість процесу прокатування в дротовому блоці, яка оцінюється за критерієм середньої результуючої подовжніх сил пластично деформованого тіла. Модель також може бути використана для уточнення технологічних параметрів, для забезпечення мінімізації зносу при збереженні оптимальних значень критерію сталості процесу прокатування.

### Література

1. Иводитов А. Н., Горбанев А. А. Разработка и освоение технологии производства высококачественной катанки. М. : Металлургия, 1989. 256 с.
2. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки / А. А. Горбанев и др. Минск : Высшая школа, 2003. 287 с.
3. Кугушин А. А., Попов Ю. А. Высокоскоростная прокатка катанки. М. : Металлургия, 1982. 220 с.
4. Максимено О. П., Марченко К. К. Методика и результаты исследования износа калибров валков при прокатке катанки в проволочном блоке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. № 2. С. 20–24.

5. Byon S. M., Lee Y. A study of roll gap adjustment due to roll wear in groove rolling: experiment and modelling. *JEM1065, Proc. JMechE Vol. 222 Part B: Engineering Manufacture*. 2008. P. 875–885.
6. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. Свердловск : Metallurgizdat, 1960. 255 с.
7. Сборник научных работ Днепропетровского государственного технического университета (Технические науки). Днепропетровск: Изд-во ДДТУ, 2016. 212 с.
8. Максименко О. П., Измайлова М. К., Лобойко Д. И. Анализ продольной устойчивости процесса прокатки с учетом внутренних сил и режима натяжений полосы. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 1. С. 59–62.
9. Максименко О. П., Лобойко Д. И., Романюк Р. Я. Анализ силового взаимодействия в очаге деформации при прокатке. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. № 6. С. 47–49.
10. Грудев А. А. Теория прокатки: Учебник для вузов. М. Metallurgiya, 1988. 240 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185060

UDC 504.064.4:66.097

**B.P. Sereda**<sup>1</sup>, Doctor of Tech. Sci., Prof.**K.V. Belokon**<sup>2</sup>, Cand. Tech. Sci., Docent**Y.A. Belokon**<sup>2</sup>, Cand. Tech. Sci., Docent**D.O. Kruglyak**<sup>2</sup>, Cand. Tech. Sci., Docent**D.B. Sereda**<sup>1</sup>, Cand. Tech. Sci.<sup>1</sup>Dniprovsky State Technical University, Kamianske<sup>2</sup>Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia

## MODEL OF THE MECHANISM REACTION FOR HYDROCARBONS ON INTERMETALLIC CATALYSTS

*The kinetic characteristics oxidation processes of propane on an intermetallic catalyst of the composition Ni-Co-Mn-Cu-Al are determined. On the basis of the modified model of Mars-Van Crevelin, effective reaction rate constants and activation energies were obtained. For the oxidation of propane on a Ni-Al-Co-Mn-Cu catalyst, the activation energy is 65.5 kJ/mol, which is 1.2 times lower than the activation energy of Ni-Al alloys.*

**Keywords:** intermetallic catalyst; Mars-Van Crevelin model; reaction rate constant; activation energy.

*Визначено кінетичні характеристики процесів окислення пропану на інтерметалічному каталізаторі складу Ni-Co-Mn-Cu-Al. На основі модифікованої моделі Марса-Ван Кревель отримані ефективні константи швидкостей реакцій і енергії активації. Для реакції окислення пропану на каталізаторі складу Ni-Al-Co-Mn-Cu енергія активації становить 65,5 кДж/моль, що в 1,2 рази нижче енергії активації Ni-Al сплавів.*

**Ключові слова:** інтерметалічним каталізатор; модель Марса-Ван Кревель; константа швидкості реакції; енергія активації.

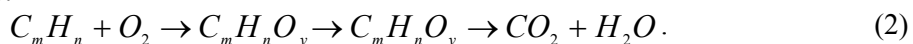
### Formulation of the problem

The study of the mechanism of catalytic reactions of deep oxidation of  $C_mH_n$  hydrocarbons is complicated by a number of features inherent in this type of reactions. They are highly exothermic, often having a large number of intermediate stages that compete with each other. The deep oxidation on the catalyst proceeds, as a rule, by a parallel mechanism:



The hydrocarbon molecule is firmly attached to the catalyst surface and the intermediate reaction products do not fly into the gas phase.

A mechanism may also be implemented whereby a portion of the intermediate products can be desorbed from the surface:



This mechanism is slower.

These two mechanisms can run in parallel, or in parallel, when one of the intermediates can be fixed on the surface of the catalyst and oxidized thereto to the end.

In deep oxidation, the main mechanism is the interaction of mobile activated oxygen with a fixed carbon complex. The mobile oxygen may be atomic oxygen (for example,  $O^-$  ions for a number of transition metal oxides) or molecular oxygen (for oxides that do not contain oxygen or easily activated metals in their lattice). In the first case, the reaction is most likely through the carbonate-carboxylate complexes, in the second case through the products of compaction, possibly through carbonyl or peroxide compounds. If there is not enough mobile oxygen in the lattice, these intermediate compounds react with  $O_2$  from the gas phase, forming radicals and peroxides that oxidize in the gas phase [1—3].

### Analysis of recent research and publications

The idea of adsorption equilibrium and the theory of kinetics of catalytic reactions on the surfaces of catalysts are formulated in the works of M.I. Tymkin, S.Z. Roginsky, S.L. Kiperman [1—3]. The mathematical model [3] of the inhomogeneous surface was proposed as a basis, and it was proposed by M.I. Tomkin, which assumes that the surface has the same number of sections of different varieties, ie uniformly-inhomogeneous surface. It was proved [2] that the experimental activation energies transmit not only the temperature dependence of the rate of the catalysis itself, but also the temperature dependence of the process speed characterizing the changes in the chemical composition of the catalyst. The influence of this factor on the kinetics of heterogeneous catalytic reactions is analyzed in the works of G.K. Boreskova [4], O.Ya. Rozovsky [2].

The kinetic equations of heterogeneous-catalytic processes serve to solve two important questions of catalysis. First, they are the basis for the rational selection of the optimal mode of the catalytic process, and second, the kinetic equations serve to verify the correct understanding of the mechanism of the process.

Therefore, for rational selection of the optimal mode of the catalytic process, additional studies are needed to confirm the correctness of the intended mechanism.

### Formulation of the research objective

The purpose of the work is to establish the regularities of the mechanism of the catalytic reactions of deep oxidation of hydrocarbons on intermetallic Ni-Al catalysts and determine their activation energy.

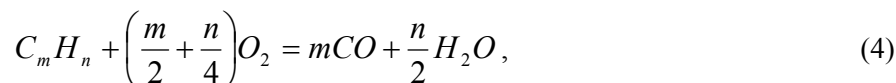
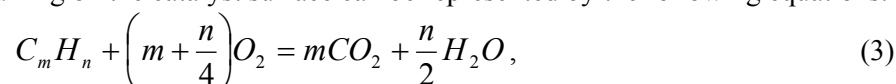
### Statement of the main material

The mathematical description of the rate of the catalytic process in the form of kinetic equations can be purely empirical, arising only from kinetic measurements or substantiated at the same time by other physicochemical methods. On the basis of the results of such complex studies [5—10], stage diagrams of the process emerge, from which certain kinetic dependences follow.

In developing the mathematical model, the following assumptions were made: the ideal displacement reactor is considered [4]; the reactor is isothermal, that is, temperature gradients in the catalyst layer parallel and perpendicular to the axis of the reactor are absent (equal to 0); catalyst activity is constant.

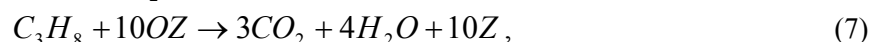
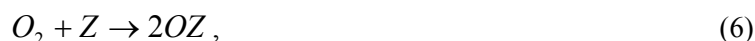
To ensure the ideal displacement mode during the experiment, the following conditions were fulfilled: the ratio of the length of the catalyst layer to the diameter of the catalyst particles in the layer more than 50; the ratio of the diameter of the reactor to the diameter of the catalyst particles is greater than 10.

The processes occurring on the catalyst surface can be represented by the following equations:



The reactions describe the process of complete oxidation of unburnt hydrocarbons and carbon monoxide.

The reaction of propane oxidation on the catalyst can be described by the following scheme [11]:



where  $Z$  — active catalyst center.

The reaction rate on the catalyst can be written in the form:

$$W = k [C_3H_8]^\alpha \cdot [O_2]^\beta, \quad (8)$$

where  $\alpha, \beta$  — stoichiometric coefficients indicating how many molecules react;  $k$  — velocity constant (constant);  $[C_3H_8], [O_2]$  — the concentrations of propane and oxygen on the catalyst surface,

respectively, which can be expressed through the particles of the catalyst surface  $\sigma$ , occupied by the molecules of these substances.

These particles can be calculated using the Langmuir isotherm [11, 12]:

$$\sigma_A = \frac{b_A P_A}{1 + \sum b_i P_i}, \quad (9)$$

$$\sigma_B = \frac{b_B P_B}{1 + \sum b_i P_i}, \quad (10)$$

where  $\sigma_A$  — the degree of filling of the catalyst surface with propane;  $\sigma_B$  — the degree of filling of the catalyst surface with oxygen;  $b_i$  — the adsorption coefficient of the  $i$ -th substance;  $P_i$  — partial pressure of the  $i$ -th substance in the gas phase;  $A$  — propane;  $B$  — oxygen.

Then the speed of the reaction will take the form:

$$W = k \cdot \sigma_A^\alpha \cdot \sigma_B^\beta. \quad (11)$$

To facilitate integration, we take  $\alpha=\beta=1$ , then the reaction rate equation will have the form:

$$W = k \cdot \frac{b_A P_A \cdot b_B P_B}{(1 + b_i P_i)^2}. \quad (12)$$

On the other hand, the reaction rate for substance  $A$  in the ideal displacement reactor can be defined as [12]:

$$W = -n_A^0 \frac{dx_A}{S \rho dl}, \quad (13)$$

where  $n_A^0$  — molar consumption of the substance  $A$ ;  $x_A$  — the molar fraction of substance  $A$  in the reaction mixture;  $S$  — the surface area of the unit of catalyst volume;  $\rho$  — bulk density of the catalyst;  $l$  — the thickness of the catalyst layer.

Then the equation of the mathematical model is written in the form [11]:

$$-n_A^0 \frac{dx_A}{S \rho dl} = k \cdot \frac{P_A \cdot P_B}{1 + B P_B^2}, \quad (14)$$

where  $P_A, P_B$  — partial pressures in the mixture of propane and oxygen, respectively;  $B$  — coefficient taking into account the effect of adsorption of reagents on the surface.

Since the oxygen content of the mixture decreases approximately in proportion to the decrease in the concentration of propane, the equation of mathematical description will look like:

$$-n_A^0 \frac{dx_A}{S \rho dl} = k \cdot \frac{x_A \cdot \gamma \cdot P}{1 + B \cdot x_A^2 \cdot \gamma^2 \cdot P^2}, \quad (15)$$

$$\gamma = \frac{x_B}{x_A}, \quad (16)$$

where  $\gamma$  — proportionality factor;  $x_A$  — the molar fraction of substance  $A$  in the reaction mixture;  $x_B$  — the molar fraction of substance  $B$  in the reaction mixture.

For the model mixture used  $\gamma=0,167$  [13].

Integrating expression (15), we obtain:

$$\int -n_A^0 \frac{dx_A}{S \rho dl} = \int k \cdot \frac{x_A \cdot \gamma \cdot P}{1 + B \cdot x_A^2 \cdot \gamma^2 \cdot P^2}. \quad (17)$$

By splitting variables:

$$-n_A^0 \int \frac{1 + B \cdot x_A^2 \cdot \gamma^2 \cdot P^2 dx_A}{x_A \cdot \gamma \cdot P} = \int k S \rho dl. \quad (18)$$

Integrating expression (18), we obtain:

$$-\frac{n_A^0}{\gamma \cdot P} \ln|x_A| + B\gamma \cdot P \frac{x_A}{2} = kS\rho l + C. \quad (19)$$

For the convenience of calculation, an effective reaction rate constant was used:

$$K_{eff} = kS\rho l. \quad (20)$$

Arbitrary continuous integration was sought under initial conditions:

$$\tau = 0; l = 0; x_A = x_{A_{nav}}. \quad (21)$$

In order to calculate the mathematical model, experimental studies were carried out at different temperatures. The study of the kinetics of deep oxidation reactions was performed on a flow-type installation. The reactor, with a catalyst sample (1 cm<sup>3</sup>, 0.1—0.3 mm fraction) installed in it, was purged with low-interest model gas mixture at a fixed temperature. The kinetics of propane combustion was investigated in the temperature range of 225—300 °C in 25 °C increments. The gas flow rate varied from 500 to 2000 ml/min. Gas pressure was measured by a pressure gauge, gas consumption by a gas meter [14].

Based on the experimental data obtained, equations (19) were used to calculate the effective reaction rate constant and the coefficient  $B$ . The results were processed using mathematical statistics methods.

Arrhenius equation was used to determine the reaction rate versus temperature:

$$K_{eff} = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (22)$$

where  $k_0$  — the constant value, the so-called pre-exponential factor, in the first approximation is independent of temperature;  $E$  — activation energy.

According to the found value of the effective reaction rate constant using the equation of the dependence of the rate constant on the temperature, a kinetic curve was constructed (Fig. 1) by which the activation energy of the propane oxidation reaction on a leached intermetallic catalyst was determined [15].

As a result of the approximation of the data model solution for solving the equation, the dependences for calculating the reaction rate of propane oxidation reaction on intermetallic catalysts of different composition were determined.

The dependences of the effective reaction rate constant and the activation energy value for the systems under test are as follows:

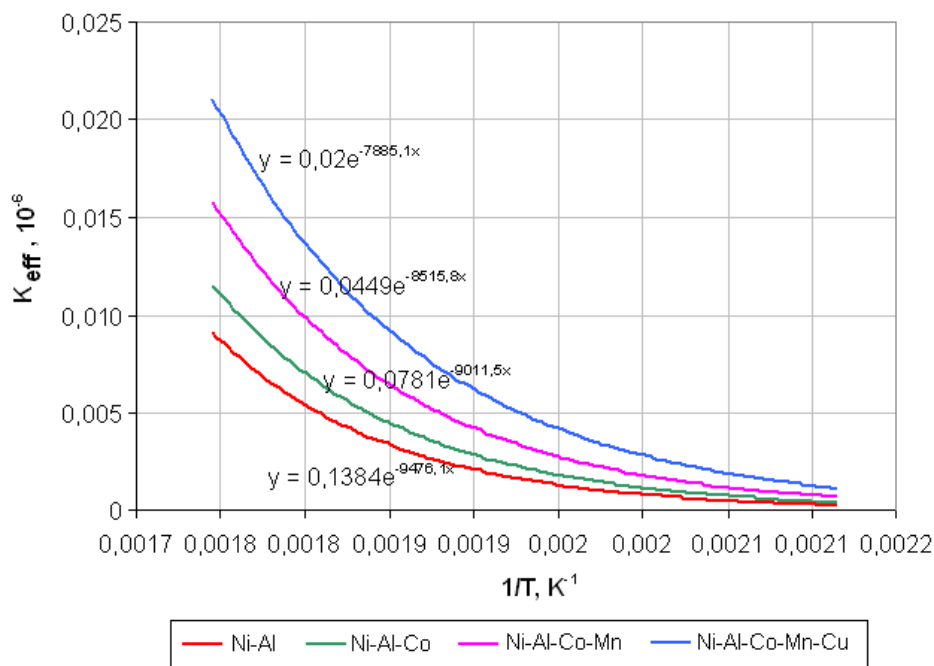
$$\text{– for the Ni-Al system: } k_{eff} = 0,1384 \cdot e^{-\frac{9476,1}{T}}, E = 78,8 \text{ kJ/mol};$$

$$\text{– for the Ni-Al-Co system: } k_{eff} = 0,078 \cdot e^{-\frac{9011,5}{T}}, E = 74,9 \text{ kJ/mol};$$

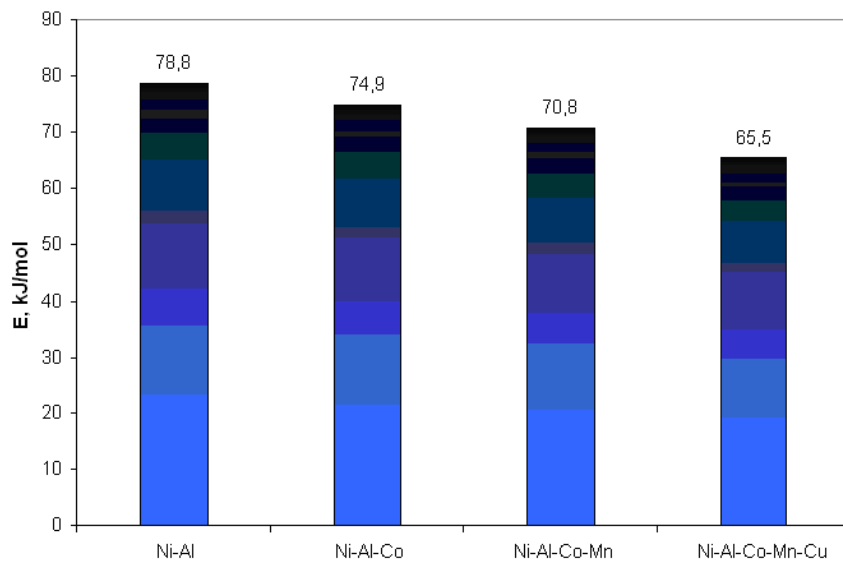
$$\text{– for the Ni-Al-Co-Mn system: } k_{eff} = 0,0499 \cdot e^{-\frac{8515,8}{T}}, E = 70,8 \text{ kJ/mol};$$

$$\text{– for the Ni-Al-Co-Mn-Cu system: } k_{eff} = 0,02 \cdot e^{-\frac{7885,1}{T}}, E = 65,5 \text{ kJ/mol}.$$

The activation energy of the propane oxidation process on the Ni-Al-Co-Mn-Cu catalyst is less than 1.2 times that on the Ni-Al catalysts of the system, that is, the rate of propane oxidation on the proposed multicomponent catalyst is higher than on the catalysts based on Ni-Al alloys.



a



b

Fig. 1. Investigation of the kinetics of propane oxidation: *a* — dependence of the effective rate constant of the reaction of propane oxidation on temperature; *b* — the value of the activation energy.

### Conclusions

The kinetic characteristics of propane oxidation processes on the intermetallic catalyst of Ni-Co-Mn-Cu-Al composition were determined. Based on the modified Mars — Van Crevelen model, effective constants of the reaction rates and the activation energy are obtained. For the reaction of propane oxidation on the catalyst composition of Ni-Al-Co-Mn-Cu activation energy is 65.5 kJ/mol, which is 1.2 times lower than the activation energy of Ni-Al alloys. Thus, the developed multi-component catalyst has a lower effective activation energy of reactions, and therefore, it more effectively oxidizes hydrocarbons.



### References

- [1] Temkin M.I. *Voprosy himicheskoy kinetiki, kataliza i reakcionnoj sposobnosti* [Questions of chemical kinetics, catalysis and reactivity], Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1955, 484 p. (in Russian).
- [2] Rozovsky A.Y. *Kinetika topohimicheskikh reakcij* [Kinetics of topochemical reactions], Moscow: Himiya, 1974, 224 p. (in Russian).
- [3] Kiperman S.L. *Osnovy himicheskoy kinetiki v geterogennom katalize* [Fundamentals of chemical kinetics in heterogeneous catalysis], Moscow: Nauka, 1979, 359 p. (in Russian).
- [4] Borekov G.K. *Kataliz. Voprosy teorii i praktiki* [Catalysis. Questions of theory and practice], Novosibirsk: Nauka, 1987, 540 p. (in Russian).
- [5] Sereda B., Sereda D., Belokon Y. Modeling deformation in material processing and laws of phasic by SHS pressing intermetallics alloys. *Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 1. P. 611–617.
- [6] Grigoryan E.A., Merzhanov A.G. *Katalizatory XXI veka* [Catalysts of the XXI century]. *Nauka proizvodstvu*, 1998, no. 3 (5), pp. 30–41 (in Russian).
- [7] Belokon K., Belokon Y. The study of catalysts based on intermetallic NiAl alloys. *Ceramic Transactions*. 2018. Vol. 262. P. 219–225.
- [8] Sereda B., Belokon' Y., Zherebtsov A., Sereda D. The Researching and modeling of physical-chemical properties of Ni-base alloys in SHS conditions. *Materials Science and Technology*. 2012. Vol.1. P. 494–498.
- [9] Belokon K., Belokon Y. The usage of heat explosion to synthesize intermetallic compounds and alloys. *Ceramic Transactions*. 2018. Vol. 261. P. 109–115.
- [10] Sereda B., Sheyko S., Kruglyak I., Belokon' Y. Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. *10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. Oxford, UK. 2008. P. 437–439.
- [11] Krylov O.V. *O mekhanizme glubokogo kataliticheskogo okisleniya uglevodorodov* [On the mechanism of deep catalytic oxidation of hydrocarbons], Deep catalytic oxidation of hydrocarbons. *Problems of kinetics and catalysis*. 1981, Vol. 18, pp. 5–13. (in Russian).
- [12] Belokon Y., Zherebtsov A., Belokon K. The investigation of physical-mechanical properties of intermetallic Ni-Al catalyst with nanostructure. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*. (Lviv, October 17-20, 2017). Lviv, 2017. P. 299–302.
- [13] Snagovsky Y.S. and Ostrovsky G.M. *Modelirovanie kinetiki geterogennykh kataliticheskikh processov* [Modeling of kinetics of heterogeneous catalytic processes], Moscow: Himiya, 1976, 248 p. (in Russian).
- [14] Belokon K.V., Belokon Y.A., Kozhemyakin G.B., Matukhno E.V. Environmental assessment of the intermetallic catalysts utilization efficiency for deactivation of the pollutants emitted by electrode production enterprises. *Scientific bulletin of National Mining University*. № 3 (153). 2016. P. 87–94.
- [15] Belokon Y., Zherebtsov A., Belokon K. The investigation of nanostructure formation in intermetallic  $\gamma$ -TiAl alloys. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*. (Lviv, October 17-20, 2017). Lviv, 2017. P. 311–314.

## МОДЕЛЬ МЕХАНІЗМНОЇ РЕАКЦІЇ ГІДРОКАРБОНІВ НА МЕЖМЕТАЛІЧНИХ КАТАЛІСТАХ

Серета Б.П., Бєлоконь Ю.О., Бєлоконь К.В., Кругляк Д.О., Серета Д.Б.

### Реферат

Вивчення механізму каталітичних реакцій глибокого окислення вуглеводнів  $C_mH_n$  ускладнено рядом особливостей, властивих цьому виду реакцій. Вони високоекзотермічні, часто мають велике число проміжних стадій, що конкурують між собою. Ці два механізми можуть проходити паралельно, або паралельно-попередньо, коли один з проміжних продуктів може закріплюватися на поверхні каталізатора і окислюватися на ньому до кінця.

Математичний опис швидкості каталітичного процесу у вигляді кінетичних рівнянь може бути чисто емпіричним, що впливають тільки з кінетичних вимірювань або обґрунтованим одночасно й іншими фізико-хімічними методами. На основі результатів таких комплексних досліджень виникають стадійні схеми процесу, з яких впливають певні кінетичні залежності.

Для розрахунку математичної моделі були проведені експериментальні дослідження при різних температурах. Дослідження кінетики реакцій глибокого окислення проводилося на установці проточного типу. Реактор, з встановленим в ньому зразком каталізатора (1 см<sup>3</sup>, фракція 0,1—0,3 мм), продувався низькопроцентних модельної газовою сумішшю при фіксованому значенні температури. Кінетика горіння пропану досліджувалася в інтервалі температур 225—300 °С з кроком 25 °С. Витрата газу змінювалася в межах від 500 до 2000 мл/хв. Тиск газу вимірювалося манометром, витрата газу — газовим лічильником. За знайденим значенням ефективної константи швидкості реакції з використанням рівняння залежності константи швидкості від температури була побудована кінетична крива за допомогою якої були визначені і енергія активації реакції окислення пропану на вилуженому інтерметалідному каталізаторі.

Визначено кінетичні характеристики процесів окислення пропану на інтерметалідному каталізаторі складу Ni-Co-Mn-Cu-Al. На основі модифікованої моделі Марса-Ван Кревель отримані ефективні константи швидкостей реакцій і енергії активації. Для реакції окислення пропану на каталізаторі складу Ni-Al-Co-Mn-Cu енергія активації становить 65,5 кДж/моль, що в 1,2 рази нижче енергії активації Ni-Al сплавів.

### Література

1. Тёмкин М.И. Вопросы химической кинетики, катализа и реакционной способности. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 484 с.
2. Розовский А.Я. Кинетика топочимических реакций. М.: Химия, 1974. 224 с.
3. Киперман С.Л. Основы химической кинетики в гетерогенном катализе. М.: Наука, 1979. 359 с.
4. Боресков Г.К. Катализ. Вопросы теории и практики. Новосибирск: Наука, 1987. 540 с.
5. Sereda B., Sereda D., Belokon Y. Modeling deformation in material processing and laws of phasic by SHS pressing intermetallics alloys. *Materials Science and Technology*. 2015. Vol. 1. P. 611–617.
6. Григорян Э. А., Мержанов А. Г. Катализаторы XXI века. *Наука производству*. 1998. №3 (5). С. 30–41.
7. Belokon K., Belokon Y. The study of catalysts based on intermetallic NiAl alloys. *Ceramic Transactions*. 2018. Vol. 262. P. 219–225.
8. Sereda B., Belokon' Y., Zherebtsov A., Sereda D. The Researching and modeling of physical-chemical properties of Ni-base alloys in SHS conditions. *Materials Science and Technology*. 2012. Vol.1. P. 494–498.
9. Belokon K., Belokon Y. The usage of heat explosion to synthesize intermetallic compounds and alloys. *Ceramic Transactions*. 2018. Vol. 261. P. 109–115.
10. Sereda B., Sheyko S., Kruglyak I., Belokon' Y. Application of activation of substrate by aluminium and copper for increase of adhesive durability of sheetings received in self-propagating

- high-temperature synthesis conditions. *10th International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. Oxford, UK, 2008. P. 437–439.
11. Крылов О.В. О механизме глубокого каталитического окисления углеводородов. Глубокое каталитическое окисление углеводородов. *Проблемы кинетики и катализа*. М.: Наука, 1981. Вып. 18. С. 5–13.
  12. Belokon Y., Zherebtsov A., Belokon K. The investigation of physical-mechanical properties of intermetallic Ni-Al catalyst with nanostructure. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*. (Lviv, October 17-20, 2017). Lviv, 2017. P. 299–302.
  13. Снаговский Ю.С., Островский Г.М. Моделирование кинетики гетерогенных каталитических процессов. М.: Химия, 1976. 248 с.
  14. Belokon K.V., Belokon Y.A., Kozhemyakin G.B., Matukhno E.V. Environmental assessment of the intermetallic catalysts utilization efficiency for deactivation of the pollutants emitted by electrode production enterprises. *Scientific bulletin of National Mining University*. № 3 (153). 2016. P. 87–94.
  15. Belokon Y., Zherebtsov A., Belokon K. The investigation of nanostructure formation in intermetallic  $\gamma$ -TiAl alloys. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017)*. (Lviv, October 17-20, 2017). Lviv, 2017. P. 311–314.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185063

UDC 621.7.06:622

**A.I. Beztsinnyi**, head of the laboratory

**N.M. Volosova**, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, volosonata@ukr.net

**A.L. Yatsuk**, senior teacher, annyatsuk36@gmail.com

Dniprovsk State Technical University, Kamianske

## MODELLING OF LOADING DISTRIBUTION TO ROLLERS SUPPORTS OF ROTATING DRUM

*The paper analyzes the factors that must be taken into account when designing machines of the drum type. The method of determining the reactions of the reference rollers of the drum type machines with the consideration of the uneven distribution of the charge material along the length of the drum and the angle of the installation of the drive gear is proposed.*

**Keywords:** modeling; drum type machines; angle of a drive gear installation; support rollers; charge material.

*В роботі проаналізовано фактори, які необхідно враховувати при проектуванні машин барабанного типу. Запропоновано методику визначення реакцій опорних роликів машин барабанного типу з урахуванням нерівномірності розташування шихтового матеріалу по довжині барабана та кута установки приводної шестерні.*

**Ключові слова:** моделювання; машини барабанного типу; кут установки приводної шестерні; опорні ролики; шихтовий матеріал.

### Formulation of the problem

Prospects for the development of mining and metallurgical complex technological lines for the preparation of ore materials involve the creation of units of high unit capacity. The design of drum type machines requires the development of more accurate methods of calculation, since it becomes irrational to compensate for the errors of approximate calculations. This leads to the necessity in their design to take into account the influence of a number of factors that have not yet been taken into account in the calculations.

### Analysis of the latest research and publications

The question of reactions determining for drum type machines supports is given attention in scientific work [1]. In this work, the calculation of the reactions of the supports of the machines of the drum type is carried out in the combination of both pairs of the support rollers and the gear crown in the same thickness, without considering the effect on their value of uneven distribution of charge material along the length of the drum, without taking into account friction in the support and rotary part of the machine links with respect to the vertical axis of the drum. There are no experimental studies of the supporting rollers reactions in the working condition of the machine. It is concluded that to calculate the reference units it is sufficient to determine the static load. In [2], the results of measuring the thickness of a layer of charge material in a rotating drum at different speeds of rotation are presented. It is found that the charge along the length of the drum can be evenly spaced with a certain slope toward the unloading side of the drum, or unevenly with considerable concentration on the loading side. This irregularity reaches three times the thickness of the charge layer on the loading side over the thickness on the loading side. Such significant irregularity extends to almost half the length of the drum, and this results in considerable uneven loading of the roller supports along the length of the drum, which is not taken into account in previous studies.

### Formulation of the study purpose

The purpose of the work is to develop a method of calculating the reactions of the machines supports for the drum type taking into account the uneven location of the charge material in the drum along its length, the influence of friction forces arising in the support-rotary part of the machine during its operation, as well as the angle of installation of the drive link with respect to the vertical the axis of the drum. To achieve this goal, the following tasks must be accomplished:

- determine the location of the charge material gravity in the drum in the transverse and longitudinal thicknesses in the drum;
- find the value of the force in the gearing by the iterative procedure;
- determine the rational location of the gear crown on the drum to ensure a uniform distribution of forces on the supports along the length of the drum.

#### Presenting main material

The scheme of the drum type machine with a gear drive of the drum is shown in fig. 1, using the following designations: 1 — drum; 2 — charge material; 3 — a bandage; 4 — the supporting roller; 5 — crown gear; 6 — drive gear;  $P_1, P_2, P_3, P_4$  are the reactions of the rollers;  $P_b$  — weight of the drum;  $P_m$  — the weight of the charge;  $P_z$  is the force in the gearing.

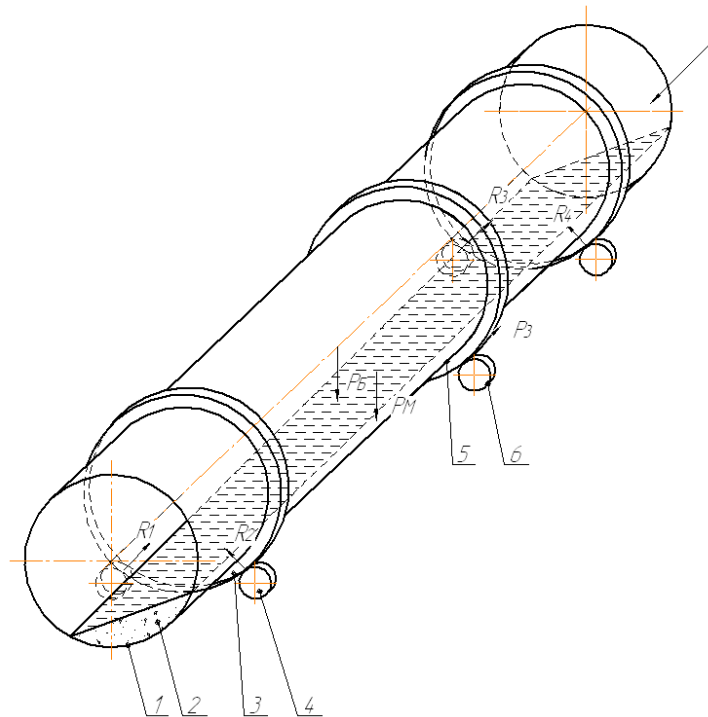


Fig. 1. Schema of a drum type machine with a gear drive

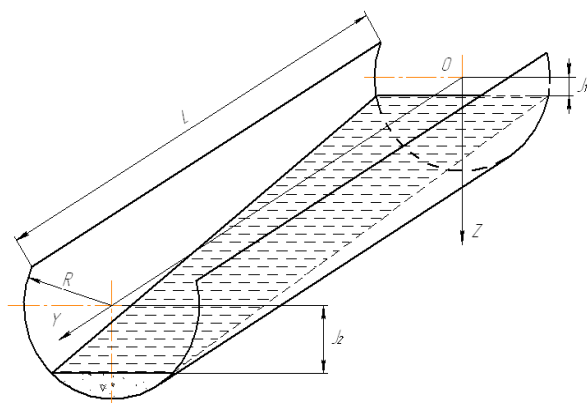


Fig. 2. The schema of the charge with a uniform slope

In the first step, to solve the main disadvantage of the previously existing methods, we determine the location of the center of gravity of the charge material in the drum in the transverse and longitudinal thicknesses. In Fig. 2 shows a diagram of the location of the charge in the drum with a uniform slope with the corresponding notation:  $R$  is the radius of the drum;  $l_1, l_2$  is the distance from the center of the drum to the chord of the charge segment, respectively, on the loading side and on the unloading side;  $L$  is the length of the drum.

The coordinate of the center of gravity of the segment cylinder of the charge relative to the axis  $OY$  is determined by the formula

$$y_c = \frac{\iiint_V y \cdot dx dy dz}{V} = \frac{\iiint_V y \cdot dx dy dz}{\iiint_V dx dy dz}, \quad (1)$$

Each of the triple integrals is determined and calculated and substituted into formula (1). After transformations and calculations, we obtain the coordinate of gravity center on the axis  $OY$ , dividing the corresponding values of the found integrals:

$$\begin{aligned} \iiint_V y dx dy dz &= \frac{\pi R^2 L^2}{4} - \frac{R^4}{\delta^2} \left[ \frac{2 \cdot l_2^2 - R^2}{4R^2} \arcsin \frac{l_2}{R} + \frac{l_2 \sqrt{R^2 - l_2^2}}{4R^2} - \frac{l_1 \cdot l_2}{R^2} \arcsin \frac{l_2}{R} - \frac{l_1 \sqrt{R^2 - l_2^2}}{R^2} - \right. \\ &- \frac{2 \cdot l_1^2 - R^2}{4R^2} \arcsin \frac{l_1}{R} - \frac{l_1 \sqrt{R^2 - l_1^2}}{4R^2} + \frac{l_1^2}{R^2} \arcsin \frac{l_1}{R} + \frac{l_1 \sqrt{R^2 - l_1^2}}{R^2} \left. \right] - \frac{1}{\delta^2} \left[ \frac{R^2 l_2 \sqrt{R^2 - l_2^2}}{8} - \frac{l_2 (\sqrt{R^2 - l_2^2})^3}{4} + \right. \\ &+ \frac{R^4}{8} \arcsin \frac{l_2}{R} + l_1 (R^2 - l_2^2)^{3/2} + \frac{l_1 (\sqrt{R^2 - l_1^2})^3}{4} - \frac{R^4}{8} \arcsin \frac{l_1}{R} - \frac{l_1 (R^2 - l_1^2)^{3/2}}{3} \left. \right]; \\ V &= \iiint_V dx dy dz = \frac{\pi R^2 L}{2} - R^2 \left( \frac{\delta \cdot L + l_1}{\delta} \arcsin \frac{\delta \cdot L + l_1}{R} + \frac{\sqrt{R^2 - (\delta L + l_1)^2}}{\delta} - \right. \\ &- \frac{l_1}{\delta} \arcsin \frac{l_1}{R} - \frac{\sqrt{R^2 - l_1^2}}{\delta} \left. \right) - \frac{1}{3\delta} \left[ (R^2 - l_1^2)^{3/2} - (R^2 - l_2^2)^{3/2} \right]^\delta, \end{aligned}$$

where  $\delta = \frac{l_2 - l_1}{L}$ .

Then the coordinate of the gravity center of the charge along the axis  $OZ$  is determined by the formula

$$z_c = \frac{\iiint_V z \cdot dx dy dz}{V} = \frac{\iiint_V z \cdot dx dy dz}{\iiint_V dx dy dz}. \quad (2)$$

After completing the necessary transformations and calculations, we obtain the value for the integral in the numerator of the formula (2):

$$\iiint_V z \cdot dx dy dz = \frac{1}{12\delta} \left( 3AR^2 - 2C + 3R^4 \arcsin \frac{B}{R^2} \right),$$

where  $A = l_2 \sqrt{R^2 - l_2^2} - l_1 \sqrt{R^2 - l_1^2}$ ;

$B = l_2 \sqrt{R^2 - l_1^2} - l_1 \sqrt{R^2 - l_2^2}$ ;  $C = l_2 \sqrt{(R^2 - l_2^2)^3} - l_1 \sqrt{(R^2 - l_1^2)^3}$ .

In the case where the surface of the charge in the drum has a constant slope, as shown in fig. 3 (curve AB), we use graphoanalytic method to find the center of gravity of the charge [4].

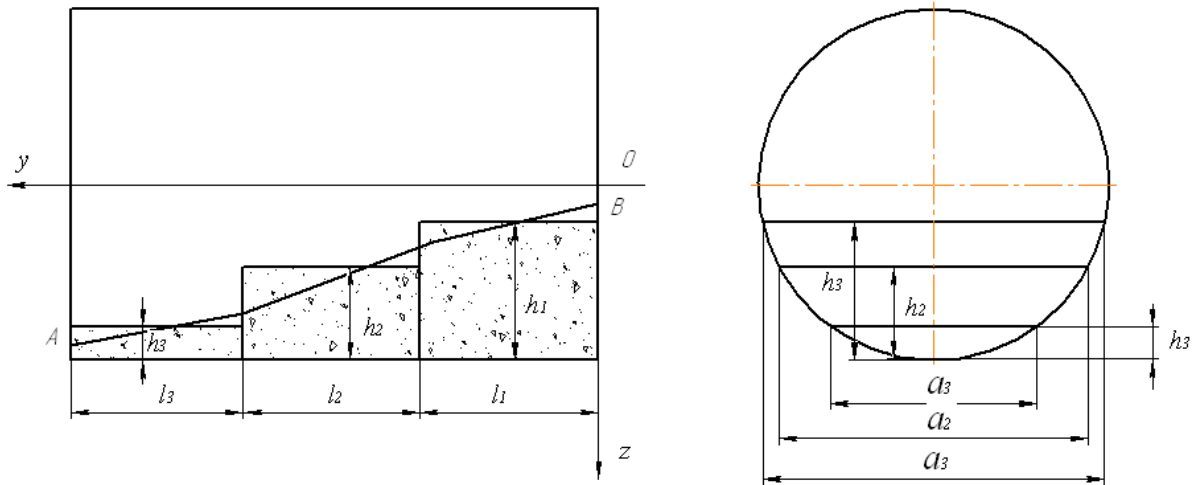


Fig. 3. Graphoanalytic method for finding the center of the charge gravity

For this purpose, the charge material in the drum is broken into a series of segment cylinders with length  $l_i$ . Replaced cylinders in cross-sectional area should be equal to the replaced cylinders. For each cylinder the chord « $a_i$ » and the arrow « $h_i$ » are measured. In relation  $a_i/h_i$  to the tables [3] we determine the length of the chord  $a_i$  and the area of the segment  $f_i$ . Then the volume of each substituted drum cylinder segment is determined by the formula

$$V_i = f_i \cdot l_i \cdot R^2,$$

where  $R$  — the radius of the drum;  $l_i$  — the length of the cylinder.

The distance from the origin to the center of gravity of the OY axis will be

$$y_c = \sum_{i=1}^n V_i \cdot y_i,$$

where  $y_i$  — the coordinate of the center of gravity of the  $i$ -th segment cylinder from the origin.

The distance from the axis of the drum to the center of gravity of each segment cylinder is given by the formula

$$z_i = \frac{a_i^3 \cdot R}{12 \cdot f_i}.$$

The distance from the axis of the drum to the center of gravity of the charge in the drum along the axis OZ is determined as follows:

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^n V_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n V_i}.$$

Then the moment on the axis of the drum by the weight of the charge is calculated by the formula:

$$M_1 = P_m \cdot z_c \cdot \sin \gamma,$$

where  $P_m$  — the weight of the charge;  $\gamma$  — the angle of lift of the center of charge in the drum as it is rotated.

Thanks to the found torque value, it is possible to determine in the first approximation the force in the gearing [5]

$$P'_3 = \frac{2M_1}{D_r \cdot \cos \alpha},$$

where  $D_r$  — the diameter of the initial circle of the teeth of the drive crown;  $\alpha$  — the gearing angle of the involute gear.

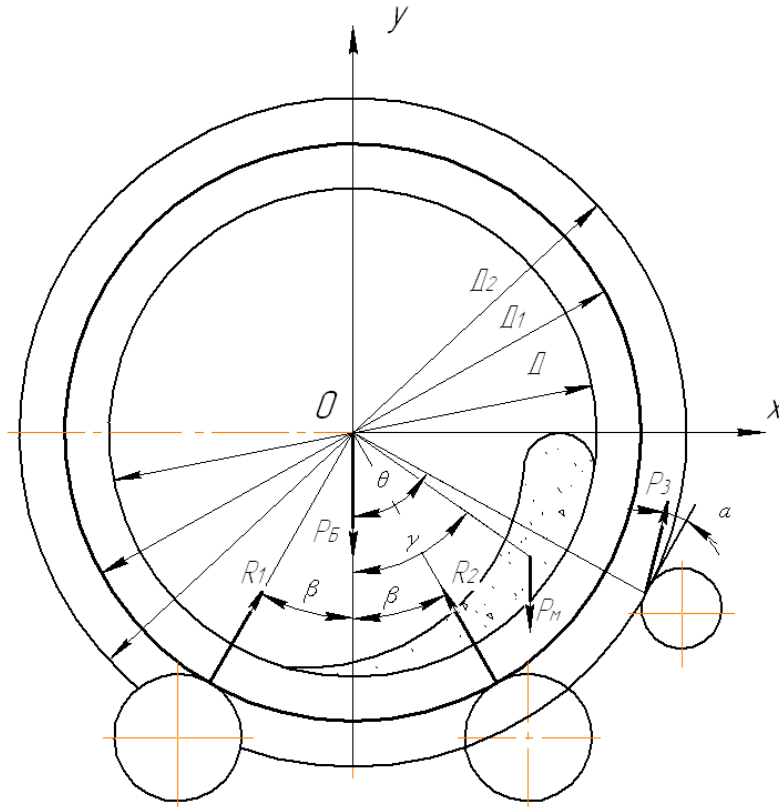


Fig. 4. The location of the charge in the drum

According to fig. 4 we project all forces on the axis OX and OY and from these equations we determine the reactions  $R'_1$  and  $R'_2$  in the first approximation

$$R'_1 = P_2 - P'_3 \frac{\cos(\theta_i + \alpha)}{\sin \beta};$$

$$R'_2 = \frac{P_5 + P_m + P'_3 [\cos(\theta_i + \alpha) \operatorname{ctg} \beta - \sin(\theta_i + \alpha)]}{2 \cos \beta},$$

where  $P_5$  — the weight of the drum;  $\beta$  — the angle of installation of the support roller with respect to the vertical axis of the drum;  $\theta_i$  — the angle of installation of the drive gear relative to the vertical axis of the drum.

Given the values of the reactions  $R_1$  and  $R_2$ , we find the moment of friction in the support of the machine. The torque from the friction forces in the roller bearings reduced to the axis of the drum is calculated as follows

$$M'_2 = (R'_1 + R'_2) \frac{d_u}{2} \cdot f \frac{D_1}{d_p},$$



where  $d_y$  — the diameter of the pin of the roller;  $f$  — coefficient of friction in the roller bearings;  $D_1$  — diameter of the bandage;  $d_p$  — the diameter of the support roller.

The moment from the friction forces of the rollers on the rollers, brought to the axis of the drum is calculated by the formula

$$M'_3 = (R'_1 + R'_2)k \cdot \frac{D_1}{d_p},$$

where  $k$  — the coefficient of rolling friction for the bandages to the rollers.

Thus, the total moment of resistance forces on the axis of the drum is equal  $M'_\Sigma = M_1 + M_2 + M'_3$ .

Thence in the second approximation, the values of the force in the gearing are obtained  $P_3'' = \frac{\alpha \cdot M'_\Sigma}{D_2 \cdot \cos \alpha}$ .

If the force  $P_3''$  value differs from the force  $P_3'$  value by less than 5%, then the force value  $P_3''$  is finite for finding reactions  $R_1''$  and  $R_2''$ . If the difference between the values  $P_3'$  and  $P_3''$  is greater than 5%, then the calculation of the response of the supports should be continued.

By determining the ultimate force  $P_3$  and having the coordinate value  $uc$  of gravity center of the charge, we can determine the optimal location of installation of the gear crown on the drum. This will ensure a uniform distribution of forces on the supports along the length of the drum [6].

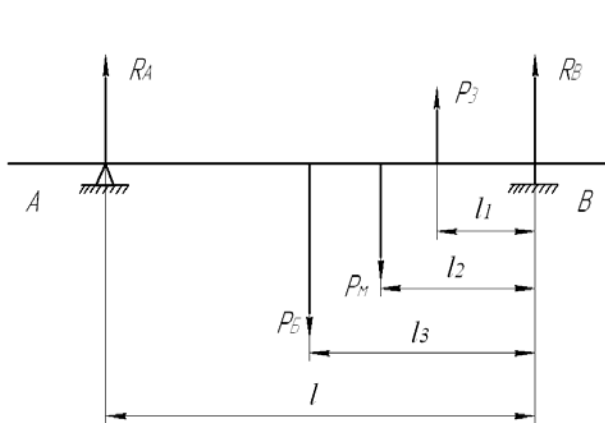


Fig. 5. Scheme for determination of supports reactions

Considering the drum as a double support beam according to fig. 5, determine the distance of installation of the crown on the drum from the support B

$$l_1 = \frac{P_B \cdot l_3 + P_m \cdot l_2 - R_A \cdot l}{P_3},$$

where  $l$  — the distance between the supports along the length of the drum;  $l_2$  — distance from support B to the line of action of the force  $P_m$ ;  $l_3$  — distance from support B to the force  $P_B$  line.

The angle of the drive gear installation also has a significant effect on the magnitude of the reactions of the supports. In fig. 6 shows the graphs of the reactions of the support rollers  $R_1$  and  $R_2$  depending on the angle of installation of the drive gear for a drum with a diameter of 2.8 m, length 8 m when loading 10% and 30%, respectively. As can be seen from the graphs, the angle of installation of the drive gear relative to the vertical axis of the drum at  $70^\circ$  is optimal. For a given angle, the values of the supports take the same values and are in the area of the smallest values.

For the fractional actuator, the optimization of the rollers force interaction with the drum is limited due to the inability to change the installation of the drive link with respect to the vertical axis of the drum.

The confirmation of the reliability of the proposed method of calculation of the reference reactions are the experimental data obtained for the case of oscilloscope bending moments in the housing of the mixer mixer drum type SBF 2,8×8 m [7]. The bending stress was measured by the resistance sensors that were attached to the drum between the blocks of the supporting rollers. The circuit diagram was coupled to a cat strain gauge with the measurement signal fixed on a beam oscilloscope. A fragment of the working waveform of bending stresses in the drum is shown in fig. 7. The point 1

shows the stresses under the driving cat, and at point 2 — under the irreducible for the case of the direction of the wheel force on the driving cat upwards. The angle of installation of the rollers to the vertical axis of the drum is within  $30^\circ$ . The nature of the waveform shows that the bending moments under the cats in the drum housing differ from each other almost twice in size, as confirmed by the calculations.

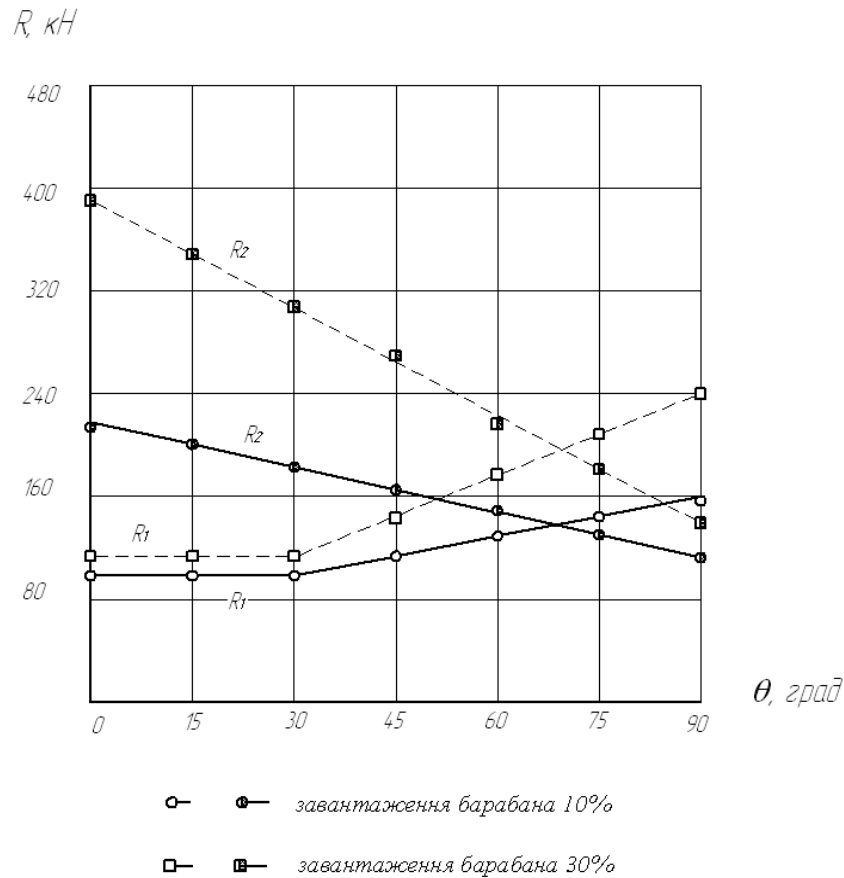


Fig. 6. Graph of changes in reactions of supports



Fig. 7. Working waveform of bending stresses in the drum

### Conclusions

The method proposed in this work, the analytical and graphical solutions constructed on it, have undergone experimental testing and allow to determine with accuracy 0.95 the reactions of the supporting rollers of machines of the drum type, taking into account the irregularities of the location of the bulk material in the drum in its length, depending on the installation. relative to the vertical axis of the drum. The developed model allows to obtain reliable results for design and testing calculations of rollers, braces and drum for strength.

### References

- [1] Grigoriev, G.G. & Sverdlik, G.I. (1971) Opredeleniie nagruzok na opornye roliki barabanyh smesiteley i okomkovateley [Determination of loads on the support rollers of drum mixers and pelletizers] / Г.Г.Григорьев, Г.И.Свердлик // Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference: *II Vsesouznaya konferentsiia "Dinamika krupnih mashin"* – All-Union Conference on the Dynamics of Large Machines. (pp.2-4).Sverdlovsk [in Russian].
- [2] Korotik, V.I. & Ganesberg A.G. (1968) Rabota barabannyh okomkovateley shihty [Work drum pelletizer charge] *Metalurgii – Metallurgy*, 1, 3-5 [in Russian].
- [3] Bronshteyn, I.N. & Semendiaiev, K.A. (1986) *Spravochnik po matematike dlia inzhenerov I uchashshihcia vtuzov* [Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges] M.: Nauka [in Russian].
- [4] Zhuk, A.Y. & Zheliabina N.K. (1998) *Mehanichne ustatkuvannia tsehv po vyrobnytstvu metaliv ta splaviv* [Mechanical equipment of workshops for the production of metals and alloys].Zaporizhia: ZDIA [in Ukrainian].
- [5] Molochnikov, N.V. (Ed.) (1970) *Aglomeratsionnoie, okomkovatelnoie i domennoie oborudovaniie: Katalog-spravochnik* [Sintering, cutting and blast furnace equipment: Directory - Reference] M.: NIIInformtiazhmash [in Russian].
- [6] Shcherbina, V.Yu., Saharov, O.S., Samilenko, Yu.N. & Bobah, V.V. (2009) Doslidzhennia termomechanichnyh navantazhen v obertoviy pechi z vyhrovym teploobminnykom [Investigation of thermomechanical loads in a rotary furnace with a vortex heat exchanger] *Naukovy visty NTUU "KPI"* – Science News of NTUU "KPI", 6, 26-33 [in Ukrainian].
- [7] Beztsinnyi, A.I., Volosova, N.M. & Yatsuk, A.L. Metodyka vyznachenia rozpodilu navantazhen na rolykoopory obertauchih barabaniv [Method of determining the distribution of loads on roller bearings of rotating drums] Proceedings of the International Conference: *Mizhnarodna naukova konferentsiia "Matematychni problem tehnychnoyi mehaniky ta prikladnoiimatematyky -2019"* – International Scientific Conference "Mathematical Problems of Technical Mechanics and Applied Mathematics - 2019". (p.97). Dnipro-Kamyanske [in Ukrainian].

### МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ НА РОЛИКООПОРИ ОБЕРТАЮЧИХ БАРАБАНІВ

Безцінний А.І., Волосова Н.М., Яцук А.Л.

#### Реферат

Проектування машин барабанного типу вимагає розробки більш точних методів обчислення, оскільки компенсувати помилки стає недоцільним. Це призводить до необхідності при їх проектуванні враховувати вплив різних факторів, які до цього часу не бралися до уваги при розрахунках. Тому це питання наразі є актуальним завданням.

Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку реакцій опор машин барабанного типу з урахуванням нерівномірності розташування шихтового матеріалу в барабані по його довжині, впливу сил тертя, що виникають в опорно-поворотній частині машини при її роботі, а також кута установки приводної ланки по відношенню до вертикальної осі барабана. Для досягнення поставленої мети поставлені наступні задачі:

- визначити розташування центру ваги шихтового матеріалу в барабані у поперечній і поздовжній товщинах в барабані;
- знайти значення сили в зубчастому зачепленні за ітераційною процедурою;
- визначити раціональне місце установки зубчастого вінця на барабані для забезпечення рівномірного розподілу сил на опори по довжині барабана.

Суттєвий вплив на величину реакцій опор здійснює також кут установки приводної шестерні. Оптимальним є кут установки приводної шестерні по відношенню вертикальної осі

барабана в  $70^\circ$ . Для даного кута значення опор приймають однакові значення і при цьому знаходяться в зоні найменших значень.

Запропонована в роботі методика, побудовані за нею аналітичні і графічні розв'язки пройшли експериментальну апробацію і дозволяють з достовірністю 0,95 визначати реакції опорних роликів машин барабанного типу з урахуванням нерівномірностей розташування сипучого матеріалу в барабані за його довжиною, в залежності від кута установки приводної шестерні по відношенню вертикальної осі барабана. Розроблена модель дає можливість отримати достовірні результати для проектних та перевірочних розрахунків роликів, бандажів та барабану на міцність.

### Література

1. Григорьев Г.Г., Свердлик Г.И. Определение нагрузок на опорные ролики барабанных смесителей и окомкователей. *Динамика крупных машин*: материалы II всесоюз. конференции (м.Свердловськ, 17-18 трав. 1971 р.). Свердловськ, 1971. С.2-4.
2. Коротик В.И., Ганесберг А.Г. Работа барабанных окомкователей шихты. *Металлургия*. 1968. №1. С. 3-5.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. Изд.13-е, испр. и доп. Москва: Наука, 1986. 544 с.
4. Жук А.Я., Желябіна Н.К. Механічне устаткування цехів по виробництву металів та сплавів: навч. посіб. Запоріжжя: ЗДІА, 1998. 210 с.
5. Агломерационное, окомковательное и доменное оборудование: кат.-справоч./ред. Н. В. Молочникова. Москва: НИИИнформтяжмаш, 1970. Ч. 1. 165 с.
6. Щербина В.Ю., Сахаров О.С., Самиленко Ю.Н., Бобах В.В. Дослідження термомеханічних навантажень в обертовій печі з вихровим теплообмінником. *Наук. вісті НТУУ «КПІ»*. Київ, 2009. № 6. С. 26-33.
7. Безцінний А.І., Волосова Н.М., Яцук А.Л. Методика визначення розподілу навантажень на роликоопори обертаючих барабанів. *Математичні проблеми технічної механіки та прикладної математики – 2019* : матеріали міжнародної наук. конф. (Дніпро-Кам'янське, 15-18 квіт. 2019 р.). Кам'янське, 2019. С.97.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185065

UDC 621.129.12

**D. Shmatko**, PhD, Associate Professor, zombizon@yandex.ua

**V. Averyanov**, PhD, Associate Professor, averyanov@ukr.net

**A. Sasov**, PhD, Associate Professor, sasov@ukr.net

**O. Cherneta**, PhD, Associate Professor, ocherneta@gmail.com

Dnipro State Technical University, Kamianske

## MATHEMATICAL MODELING OF ROLLER WEAR

*In the given work the method of noise-acoustic non-destructive control during carrying out of diagnostics of bearings of rolling of mats of wheels of cars is considered. The proposed non-destructive method of control provides an opportunity to check the efficiency of the selected lubricant, thereby increasing the life and performance of the bearings. A laboratory installation for the diagnosis of roller bearings has been created, which allows to obtain their acoustic parameters depending on the load of the bearing unit, the time of application and application of different types of lubricants in bearings. The mathematical model developed by the authors is aimed at determining the degree of wear of bearing shafts and allows them to predict their possible work life based on the received noise-acoustic parameters.*

**Keywords:** bearing; non-destructive control; diagnostics; acoustic parameters; lubricants; laboratory setting.

*В даній роботі розглядається метод шумо-акустичного неруйнівного контролю при проведенні діагностування підшипників кочення маточин коліс автомобілів. Запропонований неруйнівний метод контролю надає можливість перевірити ефективність обраного мастила, тим самим підвищити ресурс і працездатність підшипників. Створена лабораторна установка для діагностування підшипників кочення, яка дозволяє отримати їх акустичні параметри в залежності від навантаження підшипникового вузла, часу напрацювання і застосування різних видів мастильних матеріалів у підшипниках. Розроблена авторами математична модель спрямована на визначення ступеню зношування підшипників кочення та дозволяє прогнозувати їх можливий ресурс роботи на підставі отриманих шумо-акустичних параметрів.*

**Ключові слова:** підшипник; неруйнівний контроль; діагностика; акустичні параметри; мастильні матеріали; лабораторна установка.

### Formulation of the problem

The resource of cars is determined, basically, by the rolling bearings resource. Defects in the manufacture and operation of bearings in different ways affect the signal of vibration and have different diagnostic features. This allows detecting defects at the stage of their occurrence and predict further development. The manufacturing defects include: deflection of the form in the fabrication of rolling bodies, unbalanced rings, eccentricity of the wraps, radial gaps; violation of roughness of rolling surface. The defects of installation include: defects of planting bearings in the nest; strong drag; wrong centering.

The main reasons for the release of the bearing are: failure of lubrication (40%); violation of the montage (30%); other causes (20%); natural wear (10%) [1, 2].

The acoustic method of non-destructive control is based on the use of waves and elastic oscillations. When acoustic control is usually used oscillations with a frequency of 0,5 ... 25 MHz (ultrasound) [3—5]. Therefore, most acoustic techniques are ultrasound, although there are known cases of use and oscillation of the sound frequency. Currently, four methods of ultrasound evaluation of the technical condition of rolling bearings are used in practice: the Peak-factor, the direct spectrum, the spectrographs and shock impulses.

### Analysis of recent research and publications

Many scientists are involved in the diagnostics of parts and units of automobiles using non-destructive methods of control. Much attention is paid to the diagnosis of roller bearings.

So in [6] the authors proposed a method for diagnosing bearings, which involves the use of deformation measurements obtained with the help of fiber optic sensors, which allows to estimate damage by measuring the size of small chips in the bearings of bearings. Using this method it is not possible to determine the degree of bearing of the bearing, but only to assess the degree of damage to its internal and external cartridges.

Work [7] is devoted to the method of evaluation of the quality of lubricants, namely the determination of contamination in the lubrication of rolling bearings using acoustic emission signals. The authors of the article argue that the signature of the contaminated lubricant is much stronger than the effect on conventional state indicators, such as RMS. However, a comprehensive evaluation of the application of one or another lubricant in the roller bearing does not provide for the proposed method.

Proposed in [8], the methodology for the diagnosis of rolling bearings uses packet wavelet transformation, tracking the order and the approach to modeling the features for generating the diagnostic metric as a measure of difference. The disadvantages of this method of diagnostics include its great complexity (it is necessary to carry out the assessment of the distribution of the probability of the diagnostic metric, which is statistically determined in the relevant conditions of use), as well as some inaccuracy in the evaluation of bearing applications with or without lubricants.

The proposed method for the diagnosis of bearings [9] involves obtaining parameters using the method of vibration. This method of variable structure was used to improve the reliability of the malfunctioning while simultaneously reducing the uncertainty in the feedback linearization observer. The main disadvantage of diagnosing with the linearization method is that the equivalence of the initial nonlinear system and its linear approximation is preserved only for certain processes, and if the system moves from one mode to another, it is necessary to change its linearized model, that is, it makes it impossible to take into account the change in the load on bearing unit.

The method of diagnosing roller bearings in labor [10] involves identifying and eliminating defects in bearings at the stage of harvesting them in the bearings of the assembly. The authors investigate the geometry and vibration signals generated by the acting bearings. The proposed method does not make it possible to evaluate the bearing life after a certain period of working time, as well as evaluate the efficiency of the lubricant used in it.

#### **Formation of the research goal**

The purpose of the work is to develop a methodology for conducting studies of the performance of rolling bearings by the method of acoustic non-destructive testing and to obtain the dependence of the acoustic performance of the bearings on their performance, as well as the use of lubricants in them. Development of a mathematical model that predicts the rolling bearing actuation, depending on its acoustic parameters.

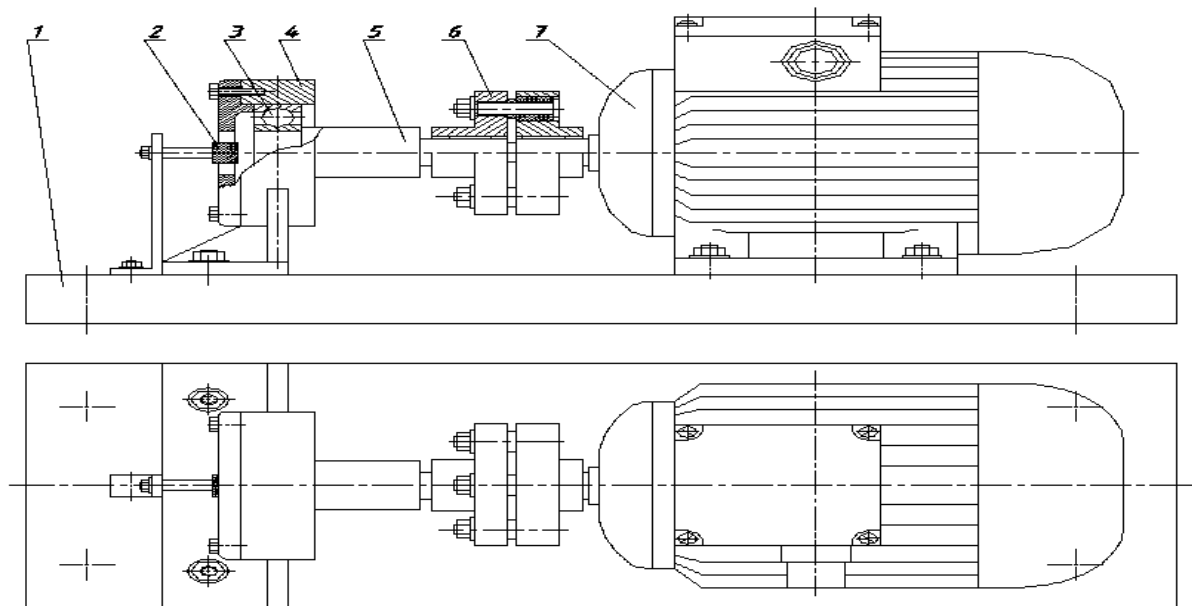
#### **Presenting main material**

Experimental studies were carried out on a laboratory installation (Fig. 1) for the diagnosis of roller bearings [11], using a sound-acoustic method using the software GoldWave and Spectrogram. For research, the bearings of the front hub of the Mercedes Vito are selected.

Experiment on research of noise-acoustic indices of rolling bearings was carried out in several stages. The first stage was carried out as follows: the bearing of the wheel hub was lubricated with lubricant number 158, and installed on a laboratory installation (Fig. 1), that is, the case with a bearing was installed with a tension on the shaft and connected to the electric motor; the system of the levers changed the load on the shaft on which the post — The bearings are rolling, thus changing the load on the bearing itself.

With acoustic sensors and computer technology, audio files were recorded with the corresponding software; after switching off the plant, it was partially disassembled to replace the bearings with another lubricant. Next, the next launch of the installation with bearings was used in which the lubricant LITOL-24 and CIATIM-201 was used and the audio files were recorded. The load shift on the bearing also occurred with the use of counter-loads.

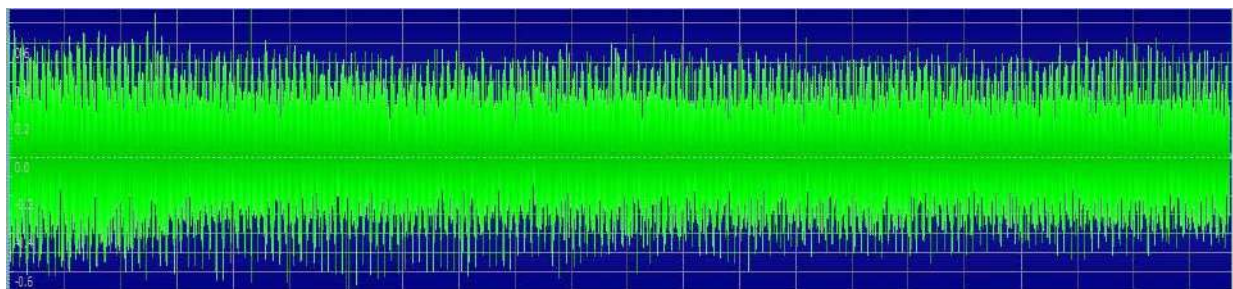
Several cycles of filing the bearings with different lubricants and different loadings on the bearing unit were carried out, and then analysis of these files was performed using GoldWave and Spectrogram programs.



*Fig. 1.* Installation for the diagnosis of roller bearings: 1 — frame; 2 — noise sensor; 3 — rolling bearing; 4 — bearing support; 5 — intermediate shaft; 6 — coupling; 7 — electric motor

The obtained data (spectrographs, diagrams and noise indicators) allow visually seeing and analyzing the wear condition of the bearing and the development of the defect in it, as well as the influence of the lubricant on the behavior of the noise-acoustic indicators.

An analysis of audio files (Fig. 2) made it possible to see how the behavior of the vibration acoustic indices of the bearing changes with the use of different lubricants.



*Fig. 2.* Diagrams of noise-acoustic indicators for bearings with the use of different lubricants

Diagrams allow you to clearly see the development of the defect and the overall picture of the state of the experimental under-spike and the dependence of the condition on the lubricant. The white color in the diagram shows the initial state of the test bearing, and the black is the limiting state.

The experiment used an electret microphone, microphone with the principle of action similar to the micro-phonons of the condenser type, which uses as a stationary plate of the condenser and the source of the post-voltage voltage plate from the electret.

Tabl. 1 provides data on the magnitude of the noise band that was recorded during each cycle of the experiment with different lubricants.

Table 1. Results of noise level measurement

Working hours, hours	100	200	300	400	500	600	800	1000	
Number of revolutions of a bearing, $10^6$ rev	6	12	18	24	30	36	48	60	
The size of the sound oscillations, dB	Lubricant №158	47.2	47.2	48.1	50.5	56.4	61.3	70.4	75.1
		47.5	47.3	48.3	50.4	56.6	61.7	70.5	75.2
		47.3	47.5	48.6	50.9	56.4	61.2	70.3	75.5
	LITOL-24	45.3	46.4	49.4	55.3	61.1	69.6	77.7	78.3
		45.5	46.1	49.7	55.7	61.2	69.2	77.4	78.6
		45.4	46.3	49.5	55.8	61.5	69.4	77.9	78.4
	CIATIM-201	42.3	50.4	56.2	64.6	68.3	74.3	78.4	80.3
		42.5	49.5	56.7	64.5	68.6	74.4	78.8	80.4
		42.6	49.8	56.3	64.2	68.4	74.5	78.4	80.5

Fig. 3 shows the dependence of sound vibrations magnitude on the development of bearings and mastic materials.

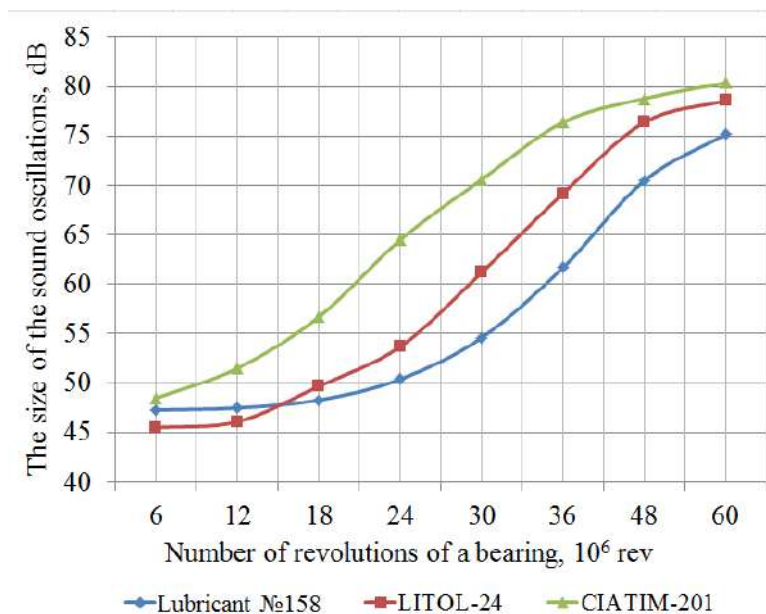


Fig. 3. The dependence of sound vibrations magnitude on the development for bearings and lubricants

In the second stage, the dependence of the radial beating of the bearings of the hub of the wheel on their overall performance was measured and the corresponding value of sound oscillations was measured. To determine the indications of radial beating of rolling bearings, a clock-type indicator mounted on a magnetic rack was used. The values of radial beating of bearings from their total output are given in Tabl. 2.



Table 2. Radial beating of bearings from their overall work

Number of revolutions of a bearing, $10^6$ rev	6	12	18	24	30	36	48	60
Radial beating of bearings, mm	9.5	11.2	12.1	15.4	18.2	25.4	32.6	41.3
The size of the sound oscillations, dB	42.3	49.4	56.2	64.6	68.3	74.3	78.4	85.3

Fig. 4 shows the dependence of the radial beat of bearings on the value of sound vibrations. For the bearing of the hub of the wheel, which was investigated, the permissible values of radial beats were set, which make up for the lower limit of 10 mm, and for the upper one — 35 mm. Depending on the value of the sound vibrations, we determine the degree of bearing operation and its possible work life.

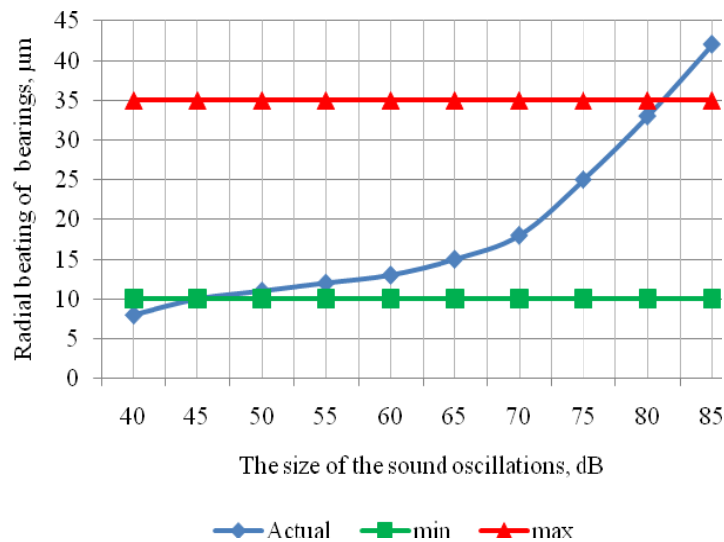


Fig. 4. Dependence of radial beating bearings on the value of sound oscillations

In the third stage a mathematical model was obtained for determining the dependence of acoustic parameters of bearings on their wear. This model takes into account the following parameters: the number of revolutions of the bearing; Load bearing perceived by the bearer; type of grease (number of penetration). Levels of variation above the above parameters are presented in Tabl. 3.

Table 3. Levels of factors variation

Factors	Marking factors	$x_i^* = -1.68$	$x_i = -1$	$x_i = 0$	$x_i = 1$	$x_i^* = 1.68$
Number of revolutions of a bearing $N, 10^6$ rev	$x_1$	5	15	30	45	55
Load bearing perceived by the bearer $G, 10^3$ H	$x_2$	4.5	5.5	7	8.5	9.5
Number of lubrication penetration $c, \text{mm}^{-1}$	$x_3$	235	250	270	290	305

Encoding of factors by means of transformation:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j0}}{I_j}, \quad (1)$$

where  $x_j$  — coded value of the factor;  $\tilde{x}_j$  — the natural value of the factor;  $\tilde{x}_{j0}$  — the natural value of the main level;  $I_j$  — variation interval;  $j$  — factor number.

We show the matrix of the plan calculated according to the formula and the corresponding results of the experiment obtained (Tabl. 4).

Table 4. The matrix of planning and research results

Experiment No.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x^2_1$	$x^2_2$	$x^2_3$	$y$	$y_p$	Deviation %
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	78.2	77.3	1.15
2	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	76.6	75.3	1.7
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	65.8	66.5	-1.1
4	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	67.3	66.5	1.19
5	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	52.4	53.3	-1.7
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	53.8	53.3	0.93
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	45.1	45.5	-0.9
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	46.4	45.5	1.94
9	1	1.68	0	0	0	0	0	2.83	0	0	80.0	81.1	-1.4
10	1	-1.68	0	0	0	0	0	2.83	0	0	45.2	44.5	1.55
11	1	0	1.68	0	0	0	0	0	2.83	0	64.6	65.6	-1.5
12	1	0	-1.68	0	0	0	0	0	2.83	0	52.7	51.6	2.09
13	1	0	0	1.68	0	0	0	0	0	2.83	57.2	58.4	-2.1
14	1	0	0	-1.68	0	0	0	0	0	2.83	58.8	58.4	0.68
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57.6	58.4	-1.4
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57.1	58.4	-2.3
17	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58.8	58.4	0.68
18	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59.3	58.4	1.52
19	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59.1	58.4	1.18
20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59.6	58.4	2.01

In this case, the mathematical model for a complete four factor experiment with the interaction of the mode has the form:

$$y_p = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x^2_1 + b_{22}x^2_2 + b_{33}x^2_3. \quad (2)$$

The coefficients of the model are calculated by the formula:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} \cdot y_i}{N}, \quad (3)$$

where  $j = 0, 1, 2, \dots, k$ ;  $N$  — number of performed experiments ( $N = 20$ ).

The coefficients of the model (2), which are calculated by the formula (3), make up:

$$b_0 = 58.5; \quad b_1 = 10.9; \quad b_2 = 4.1; \quad b_3 = -0.83; \quad b_{12} = 1.5; \quad b_{13} = 0.25; \quad b_{23} = 0.75; \\ b_{11} = 1.55; \quad b_{22} = 0.14; \quad b_{33} = -0.4.$$

The dispersion  $S_y^2$  of reproducibility is determined by the results of research in the center of the plan. Dispersions that characterize the errors in determining the coefficients of the regression equation according to [12] for  $k = 4$  are:

$$S^2 \{b_0\} = 0.5833; S^2 \{b_i\} = 0.2563; S^2 \{b_{ii}\} = 0.1375; S^2 \{b_{ij}\} = 0.0433.$$

When checking the coefficients by the criterion of the Investigator (with a 5% level of significance and a degree of free-body  $f = 4$ ) found that all the coefficients are significant and exceptionally to the model (2).

Substituting the found coefficients into equation (2), we obtain the following relation:

$$y = 58.5 + 10.9 \cdot \tilde{x}_1 + 4.1 \cdot \tilde{x}_2 - 0.83 \cdot \tilde{x}_3 + 1.5 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_2 + 0.25 \cdot \tilde{x}_1 \cdot \tilde{x}_3 + 0.75 \cdot \tilde{x}_2 \cdot \tilde{x}_3 + 1.55 \cdot \tilde{x}_1^2 + 0.14 \cdot \tilde{x}_2^2 - 0.4 \cdot \tilde{x}_3^2. \quad (4)$$

The verification of the hypothesis of the adequacy of the model (4) according to Fisher's criterion at the 5% level of significance and the degrees of freedom of dispersion of adequacy  $f_{ad} = N - k - (n_0 - 1) = 20 - 4 - (6 - 1) = 11$  and dispersion of reproducibility  $f_y = n_0 - 1 = 6 - 1 = 5$  showed that the obtained models are adequate, since the calculated value of the criterion is less tabular  $F_{cal} = 1.54 < F_T(0.05; 11; 5) = 3.2$  [13].

In the equation (4), the variables  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$  are coded values:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{N - 30}{15} = 0.067 \cdot N - 2; \\ \tilde{x}_2 &= \frac{G - 7}{1.5} = 0.67 \cdot G - 4.67; \\ \tilde{x}_3 &= \frac{\rho - 270}{20} = 0.05 \cdot \rho - 13.5. \end{aligned} \quad (5)$$

where  $N$  — number of revolutions of a bearing,  $10^6$  rev;  $G$  — load bearing perceived by the bearer,  $10^3$  H;  $c$  — number of lubrication penetration,  $\text{mm}^{-1}$ .

For ease of computation, we convert the mathematical model (4) to a natural value:

$$\begin{aligned} \partial B &= 33.15 - 0.381 \cdot N - 6.92 \cdot G + 0.3 \cdot \rho + 0.067 \cdot N \cdot G + 0.00084 \cdot N \cdot \rho + 0.025 \cdot G \cdot \rho + \\ &+ 0.007 \cdot N^2 + 0.063 \cdot G^2 - 0.001 \cdot \rho^2. \end{aligned} \quad (6)$$

### Conclusions

On the basis of the conducted experiment and the analysis of the data obtained, it can be concluded that the method of non-destructive noise-acoustic control of roller bearings with the use of various lubricants is used to obtain the most reliable data on the degree of wear of rolling bearings, their operation and to prevent the destruction of the entire site as a whole.

The considered noise-acoustic method allows us to develop recommendations for the application of certain types of lubricants in roller bearings.

The developed mathematical model allows, based on the acoustic parameters of the bearings, which were obtained during experimental studies, to determine the degree of wear and to predict the potential life of the bearing roller.

### References

- [1] Korobochka, O., Skorniyakov, E., Sasov, O. (2007) *Osnovy rozrakhunkiv, proektuvannia i ekspluatatsii tekhnichnoho obladnanniadlia avtomobilnoho transportu* [Fundamentals of calculation, design and operation of technical equipment for motor transport]. Dneprodzerzhinsk: DSTU [in Ukrainian].
- [2] Kanevsky, I., Sampikova, I. (2007) *Nerazrushayuschie metody i kontrolya* [Nondestructive methods of control]. Vladivostok: DVSTU [in Russian].
- [3] Klyuev, V., Sosnin, F., Kovalyov, A. (2003) *Nerazrushayuschiy kontrol i diagnostik* [Non-Destructive Testing and Diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

- [4] Martynovskiy, V. (2002) Ispolzovanie spectra ogibayushey visokochastotnoy vibratsii dlya diagnostiki podshipnikov kacheniya [Using the envelope spectrum of high-frequency vibration to diagnose rolling bearings]. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy kontrol – Technical diagnostics and non-destructive testing*, 3, 17–22 [in Russian].
- [5] Shipulin, M., Li, R., Butan, A. (2010) Vosstanovlenie polimernoy kompozitsiy i nerazrushayushiy kontrol podshipnikov kacheniya selskohozyaystvennoy tekhniki [The restoration of the polymer composition and non-destructive testing of rolling bearings of agricultural machinery]. *Vestnik MichGAU – Herald MichGAU*, 1, 181–185.
- [6] Alian, H., Konforty, S., Ben-Simon, U., Klein, R., Tur, M., Bortman, J. (2019) Bearing fault detection and fault size estimation using fiber-optic sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120(1), 392–407.
- [7] Martin-del-Campo, S., Schnabel, S., Sandin, F., Marklund, P. (2019) Detection of particle contaminants in rolling element bearings with un supervised acoustic emission feature learning. *Tribology International*, 63(1), 30–38.
- [8] Schmidt, S., Heyns, P., Gryllias, K. (2019) A discrepancy analysis methodology for rolling element bearing diagnostics under variable speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 116, 40–61.
- [9] Piltan, F., Kim, J. (2018) Bearing fault diagnosis using an extended variable structure feedback linearization observer. *Sensors (Switzerland)*, 18(12), 43–59.
- [10] Jakubek, B., Jakubowicz, M., Smuiek, W. (2018) Comparison of rolling bearings' diagnosing methods – Procedures of damage introduction. *Vibrations in Physical Systems*, 29, 11–19.
- [11] Shmatko, D., Averyanov, V., Slota, I. (2017) Otrymannia shumodiahnostychnykh parametriv pidshypnykiv kochennia v zalezhnosti vid zastosuvannia mastylnykh materialiv v laboratornykh umovakh [Obtaining noise-diagnostic parameters of rolling bearings, depending on the use of lubricants in the laboratory]. *Zbirnyk naukovykh prats Lutskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Collection of scientific papers of Lutsk National Technical University*, 10, 217–221 [in Ukrainian].
- [12] Shklyar, V. (2010). *Planirovanie eksperimenta i obrabotka rezultatov [Experiment planning and results processing]*. Tomsk: TPU, [in Russian].
- [13] Suhov, A. (1982) *Matematicheskaya obrabotka rezultatov izmereniy [Mathematical processing of measurement results]*. Moscow: MISI [in Russian].

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗНОШУВАННЯ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Шматко Д.З., Авер'янов В.С., Сасов О.О., Чернета О.Г.

### Реферат

Ресурс автомобілів визначається, в основному, ресурсом підшипників кочення. Дефекти виготовлення і експлуатації підшипників по різному впливають на сигнал вібрації і мають різні діагностичні ознаки. Це дозволяє виявити дефекти на етапі їх виникнення та прогнозувати подальший розвиток. До дефектів виготовлення відносяться: відхилення форми при виготовленні тіл кочення, неврівноваженість кілець, ексцентриситет обойми, радіальні зазори; порушення шорсткості поверхні кочення. До дефектів монтажу відносяться: дефекти посадки підшипників у гнізда; сильне затягування; неправильне центрування.

Акустичний метод неруйнівного контролю заснований на використанні хвиль і пружних коливань. При акустичному контролі зазвичай використовують коливання з частотою 0,5...25 МГц (ультразвукові). Тому більшість акустичних методів є ультразвуковими, хоча відомі випадки використання і коливань звукової частоти. У даний час в практиці використову-

ються чотири методи ультразвукової оцінки технічного стану підшипників кочення: Пікчинника, прямого спектру, спектру огинаючих і ударних імпульсів.

Метою роботи являється розробка методики проведення досліджень працездатності підшипників кочення методом акустичного неруйнівного контролю та отримання залежностей акустичних показників роботи підшипників від їх напрацювання, а також застосування в них мастильних матеріалів. Розробка математичної моделі, яка передбачає оцінювання спрацювання підшипника кочення в залежності від його акустичних параметрів.

На основі проведеного експерименту та аналізу отриманих даних, можна зробити висновок, що застосований метод неруйнівного шумо-акустичного контролю підшипників кочення з застосуванням різних мастильних матеріалів, дозволяє отримати найбільш достовірні данні про ступінь зношення підшипників кочення, їх спрацювання та попередити руйнування всього вузла в цілому.

Розглянутий шумо-акустичний метод дозволяє розробити рекомендації по застосуванню тих чи інших видів мастильних матеріалів у підшипниках кочення.

Розроблена математична модель дозволяє на підставі акустичних параметрів підшипників, які були отримані при проведенні експериментальних досліджень, визначити ступінь зношення та прогнозувати можливий ресурс роботи підшипника кочення.

### Література

- 1 Коробочка О. М., Скорняков Е. С., Сасов О. О. Основи розрахунків, проектування і експлуатації технічного обладнання для автомобільного транспорту : навч. посіб. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. 226 с.
- 2 Каневский И. Н., Сампикова О. Н. Неразрушающие методы контроля : учеб. пооб. Владивосток: ДВГТУ, 2007. 243 с.
- 3 Клюев В. В., Соснин Ф. Р., Ковалёв А. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. Москва: Машиностроение, 2003. 656 с.
- 4 Мартыновский В. А. Использование спектра огибающей высокочастотной вибрации для диагностики подшипников качения. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2002. №3. С. 17–22.
- 5 Шипулин М. А., Ли Р. И., Бутан А. В. Восстановление полимерной композицией и неразрушающий контроль подшипников качения сельскохозяйственной техники. *Вестник МичГАУ*. 2010. №1. С. 181–185.
- 6 Alian H., Konforty S., Ben-Simon U., Klein R., Tur M., Bortman J. Bearing fault detection and fault size estimation using fiber-optic sensors. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 120(1). P. 392–407.
- 7 Martin-del-Campo S., Schnabel S., Sandin F., Marklund P. Detection of particle contaminants in rolling element bearings with un supervised acoustic emission feature learning. *Tribology International*. 2019. Vol. 63(1). P. 30–38.
- 8 Schmidt S., Heyns P., Gryllias K. A discrepancy analysis methodology for rolling element bearing diagnostics under variable speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019. Vol. 116. P. 40–61.
- 9 Piltan F., Kim J. Bearing fault diagnosis using an extended variable structure feedback linearization observer. *Sensors (Switzerland)*. 2018. Vol. 18(12). P. 43–59.
- 10 Jakubek B., Jakubowicz M., Smuiek W. Comparison of rolling bearings' diagnosing methods – Procedures of damage introduction. *Vibrations in Physical Systems*. 2018. Vol. 29. P. 11–19.
- 11 Шматко Д. З., Аверьянов В. С., Слота І. О. Отримання шумо-діагностичних параметрів підшипників кочення в залежності від застосування мастильних матеріалів в лабораторних умовах. *Збірник наукових праць Луцького національного технічного університету*. 2017. Вип.10. С. 217–221
- 12 Шкляр В. С. Планирование эксперимента и обработка результатов. Томск: ТПУ, 2010. 247 с.
- 13 Сухов А. Н. Математическая обработка результатов измерений : учеб. пособ. Москва: МИСИ, 1982. 89 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185066

UDC 656.135.8

**B.P. Sereda**, Head of the Department of Cars and Automobile Economy, Ph.D., prof.,  
seredabp@ukr.net

**D.Y. Mukovska**, graduate student of the department "Cars and Automobile Economy",  
seredabp@ukr.net  
State Higher Educational Institution "Dniprovsky State Technical University", Kamianske

## ANALYSIS OF METALLURGICAL ENTERPRISE FUNCTIONING CAREER

*This article analyzes the main aspects of the of the Zaporizhstal metallurgical enterprise operation slag processing plant. The production functions, structure, capacity of the shop are described. The volume, structure, main production indicators of the Zaporizhstal Slag Processing Plant 2017—2018 is analyzed. The main types and volumes of recycled process waste are presented. The expediency of their use in own production is shown.*

**Keywords:** process wastes; blast furnace slag; open-hearth slag; scrap metal; scrap iron; dump trucks.

*У даній статті проаналізовані головні аспекти функціонування цеху шлакопереробки металургійного підприємства ПАТ «Запоріжсталь». Описані виробничі функції, структура, потужності цеху. Проаналізовані об'єм, структура, основних виробничих показників цеху шлакопереробки ПАТ «Запоріжсталь» 2016—2018 рр. Наведені основні види та обсяги перероблених технологічних відходів. Показана доцільність їх використання у власному виробництві.*

**Ключові слова:** технологічні відходи; доменний шлак; мартенівський шлак; металомістки відходи; скрап чугунка; самоскиди.

### Statement of the problem

The metallurgical industry occupies an important place in the economy of the country, being the basic industry. Modern metallurgical enterprises are complex economic complexes with high level of development. In recent years, due to the formation and accumulation of a significant amount of industrial waste and the need to solve environmental problems, the importance of integrated waste management has increased. One of the pressing problems of metallurgy is the problem of metallurgical slag processing. The activity of metallurgical enterprises is accompanied by the receipt of a large amount of iron-containing waste, much of which is still not used, stored in waste heaps, storage facilities, sedimentation tanks. Such wastes include metallurgical slag. Slag is formed in the process of steel smelting. The slag accounts for a significant portion of metallurgical waste. Slag dumps are anthropogenic deposits of a mixture of metal and oxide components, each of which is a valuable raw material. Slag dumps and dumps occupy large areas and adversely affect the environment. The main way to reduce the damage from metallurgical slag to the environment is to remake it [1, 2, 3].

Slag dumps, located within the city, near metallurgical plants, change the landscape, negatively affect the environment, worsen the environmental situation. The problem of environmental protection is one of the most important tasks of today.

Slag is a waste that is generated at high temperatures due to the physical — chemical interaction of the components of the source solid materials and the gas environment. Metallurgical slag contains a number of components that can be effectively reused. Slag is also used in road construction, hydraulic engineering, construction materials production, agriculture, chemical industry, medicine and other industries. The large amount of industrial waste having a chemical and mineralogical composition that is close to that of the extracted raw materials makes it possible to state that the use of the waste is promising. [4,5]. One of the tasks of the development of factory waste heaps is the maximum complete extraction of scrap metal in order to use them as recycling scrap in the metallurgical industry.

### **Analysis of recent research and publications**

Modern economic development of Ukraine is accompanied by environmental problems of anthropogenic nature. The technological processes associated with the processing of natural raw materials into industrial products are accompanied by the formation of a significant amount of waste. [6].

The use of industrial waste in the production of materials is one of the important directions in the development of science. Not only does it solve environmental problems, but it is also economically viable because it reduces the cost of production. The large amount of industrial waste having a chemical and mineralogical composition that is close to that of the extracted raw materials makes it possible to state that the use of the waste is promising. Technological waste is ambiguous in composition. It should be noted that the modern concept of waste management at metallurgical enterprises involves the repeated use of secondary resource materials for the enterprise's own needs or beyond, provided that they are recycled. [7, 8, 9].

Metallurgical processes take place at a considerable expense of various material and raw material resources, which make up to 7 t / t from the extraction of ore to the receipt of finished rolling. The specific consumption of only the main types of material resources in ferrous metallurgy is, t / t of the product: in sinter production 1,27—1,32, in the production of iron 1,70—2,00, in the production of steel 1,08—1,15, rolling — 1,12—1,50. At this level of production, thousands of different types of industrial waste are generated. Thus, the specific output of sludge and dust in sintering, blast furnace, steelmaking and rolling shops are respectively 0.07—0.16; 0.06—0.22, 0.01—0.03 and 0.03—0.07 t / t of product. [10].

Martian sludge's are the most highly dispersed among metallurgical sludge's, which complicates the preparation process for their utilization. The mass fraction of iron in them is 47—58%. Metallurgical enterprises of Ukraine have accumulated 240 million tonnes of slag, 128 million tonnes of which are steelmaking. The number of accumulated slag in Ukraine leads the Yenakiyev Metallurgical Plant, ArcelorMittal Kryviy Rih and Zaporizhstal. Typically, blast furnace slag is separated from the smelter. The mass fraction of iron in them is 5% in the form of queens. [11].

### **Goal setting**

The main aspects of the operation of the slag processing plant of the metallurgical enterprise are analyzed. Describe the production functions, structure, capacity of the shop. Analyze the volume, structure, key performance of the slag processing plant. List the main types and volumes of recycled process waste. Show the feasibility of using them in your own production.

### **Presenting main material**

The slag processing plant is a structural unit of "Zaporizhstal", which organizes and provides acceptance, unloading and storage of blast furnace, open-hearth slag of the current production and waste of the shop's shops, granulation (discharge of liquid blast furnace slag on the granny basin) and shipment to consumers of blast furnace the schedule. Also, the slag-processing shop performs iron extraction from blast furnace slag, extraction of scrap steel and blast furnace from open-hearth slag.

The purpose of slag processing is mainly to extract metal-containing materials required for basic metallurgical production. There is an opportunity to sell recycled fractional slag to consumers for road construction and other needs, as well as to vacate waste storage areas. This reduces the cost of storing waste, securing the production of scrap metal and generating additional revenue from the sale of slag, rubble, sand or other building materials.

The slag processing plant includes the granbasin section and the debris dewatering sites, the blast furnace slag processing section, and the open-hearth slag processing section.

The section of the granbasin and the site of dehydration of granbak provides the production, storage, dehydration of granular blast furnace slag and its delivery to consumers. Liquid blast furnace slag enters the granbasin buckets, drains into the pool sections, loads the debris dewatering site, and bucket debris is directed to the blast furnace processing section. At the site of dehydration, the granary is loaded into the wagons to consumers.

The blast furnace processing department performs scrap extraction from blast furnace slag, provides bucket bucket with liquid blast furnace slag, bucket breakout after draining on granbasin, removal of slag from dead ends and its transportation and storage.

The processing center of open-hearth slag provides extraction of steel scrap from open-hearth slag, performs extraction of metal-containing waste, sorting of slag by fractions provides selection from dead ends of open-hearth slag and other production wastes, dumping them into a dump.

The transportation of slag at the production sites of the workshop is mainly performed by BelAZ brand dump trucks. Career dump trucks are distinguished by their high durability, high load capacity and high body capacity. At the sites of processing slag cars, dump trucks transport slag from the unloading dead ends to the places of its storage and processing. [12].

The main production indicators of the slag processing plant are the final products of slag processing. The final products of blast furnace processing are cast iron scrap, slag fractions 0—10 mm, slag fractions 10—40 mm, slag fractions 60—150 mm, slag ordinary. Cast iron scrap is used mainly in production, and fractional and ordinary slag for general construction works. The structure and volumes of blast furnace processing products are presented in Tabl. 1.

Table 1. Structure and volumes of blast furnace processing products for 2016-2018

Type of recycling product	Production volumes, thousand tons		
	2016	2017	2018
Cast iron scrap	3,505	3,641	3,088
Slag fraction 0-10 mm	410,557	565,315	297,248
Slag fraction 10-40 mm	92,768	258,750	433,403
Slag fraction. 60-150 mm	0	0	10,169
Normal slag	245,118	103,584	111,845
<b>Total</b>	<b>751,948</b>	<b>931,290</b>	<b>855,753</b>

The final products of the processing of open-hearth slag are metal-containing waste (ISA) and open-hearth slag 10—60 mm. which are mostly used in their own production. The structure and volumes of the open-hearth slag processing products are presented in Tabl. 2.

Table 1. Structure and volumes open-hearth slag processing products for 2016-2018

Type of recycling product	Production volumes, thousand tons		
	2016	2017	2018
Metal waste-1	66,751	78,407	86,945
Metal waste-2	45,285	41,047	32,289
Metal waste-3	19,477	24,084	27,211
Open-hearth slag 10-60 mm	139,026	140,433	152,129
<b>Total</b>	<b>270,539</b>	<b>283,971</b>	<b>298,574</b>

### Conclusions and prospects for further research

Metallurgical slag is an undesirable but also inevitable product of the activity of metallurgical enterprises. Analyzing the above, we can conclude that the use of technological waste solves a complex of issues to reduce technogenic load in the vicinity, reduce the need for primary raw materials, reduce environmental pollution, reduce the land area of technological waste accumulation. Therefore, the recycling of technological waste is appropriate not only economically but also from an environmental point of view.

Thus, in the conditions of "Zaporizhstal", the operation of the slag processing plant allows the application of recycling measures of technological waste of the main production, which allow to partially solve the problem of shortage of iron ore and improve the environmental situation in the region.

### References

- [1] Plotnikov, V. V. (2012) Perspektyvy utylizatsii promyslovykh vidkhodiv u metalurhiinomu vyrobnytstvi [Prospects for utilization of industrial waste in metallurgical production]. *Visnyk*



- Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu – Bulletin of Kryvyi Rih National University*, 3, 215–219 [in Ukrainian].
- [2] Kvatov, D. B. (2016) Pererabotka shlaka v chernoi metallurhyy putem drobleniya y yzvlacheniya dopolnytelnoho sy`r`ya [Slag processing in ferrous metallurgy by crushing and extraction of additional raw materials]. *Nauka y tekhnika Kazakhstana – Science and technology of Kazakhstan*, 3, 88–90 [in Kazakhstan].
- [3] Sereda, B. P., & Mukovska, D. Ia. (2018) Zakhody pidvyshchennia samoskydiv v umovakh kariery metalurhiinoho pidpriemstva [Measures to increase dump trucks in the career of metallurgical enterprise]. *Visnyk NTU "KhPI" – Bulletin of NTU "KPI"*, 23, 62–66 [in Ukrainian].
- [4] Rud, V.D., Saviuk, I.V., Samchuk, L.M., & Povstiana Yu.S. (2015) Analiz kilkosti utvorenykh vidkhodiv mashynobuduvannia ta metalurhii na terytorii Ukrainy [Analysis of the amount of waste generated by mechanical engineering and metallurgy in Ukraine]. *Visnyk "TNTU" – Bulletin of "TNTU"*, 3, 130–136 [in Ukrainian].
- [5] Avramenko, S. Kh., & Volokh, Yu.V. (2010) Ekolohichni problemy vid nakopychennia tverdykh promyslovykh vidkhodiv ta shliakhy vykorystannia metalurhiinykh shlakiv [Environmental problems from the accumulation of solid industrial waste and the use of metallurgical slag]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Proceedings of the National Mining University*, 35, 200–2016 [in Ukrainian].
- [6] Fediushko, M. P. (2015) Stan promyslovykh vidkhodiv mista Mariupol ta yikh utylizatsiia [The state of industrial waste in the city of Mariupol and their disposal]. *Visnyk Ahrarnoi nauky Prychornomia – Bulletin of the Agrarian Science of the Black Sea*, 2, 187–195 [in Ukrainian].
- [7] Sereda, B. P., & Mukovska, D. Ia. Doslidzhennia efektyvnosti roboty samoskydiv BelAZ v umovakh kariery metalurhiinoho pidpriemstva [Investigation of the efficiency of BelAZ dump trucks in the career of metallurgical enterprise]. *Perspektyvy tekhnolohii ta prylady – Technology perspectives and devices*, 13, 125–131 [in Ukrainian].
- [8] Iehorov, K. V. (2010) Analiz vidkhodiv metalurhiinoho vyrobnytstva [Analysis of metallurgical waste]. *Spetsialna metalurhiia: vchora, sohodni, zavtra – Special Metallurgy: yesterday, today, tomorrow*, 193–196 [in Ukrainian].
- [9] Naziuta, L.Iu., Smotrov, A.V., Hubanova, A.V., & Kornev, H.V. (2011) Struktura obrazovannia y retsyklynh tekhnolohycheskykh otkhodov na metallurhycheskykh predpriyatiakh polnoho tsykla [Structure of formation and recycling of technological wastes at full cycle metallurgical enterprises]. *Enerhotekhnolohyy y resursoberezhenye – Energy technology and resource saving*, 4, 44–54 [in Ukrainian].
- [10] Kotov, Yu. T. (2012) Analiz utvorennia vidkhodiv metalurhiinoho vyrobnytstva i rozrobka metodiv yikh povtornoho vykorystannia na PAT Arselormmital Kryvyi Rih" [Analysis of generation of metallurgical waste and development of methods of their re-use at "Arselormmital Kryvyi Rih"]. *Hirnychiy visnyk – Mountain Bulletin*, 95, 232–236 [in Ukrainian].
- [11] Nikolaienko, K. V., & Samoilenko, N.A. (2016) Kompleksne vykorystannia metalurhiinykh shlakiv [Integrated use of metallurgical slag]. *Zbahachennia korysnykh kopalyn – Mineral processing*, 3, 127–131. Retrieved from [https://scholar.google.com.ua/scholar?cluster=4350679822347770136&hl=ru&as\\_sdt=0,5](https://scholar.google.com.ua/scholar?cluster=4350679822347770136&hl=ru&as_sdt=0,5). [in Ukrainian].
- [12] Sereda, B. P., & Mukovska, D.Ia. (2018) Optyimizatsiia roboty metalurhiinoho pidpriemstva shliakhom analizu ekspluatatsiinykh pokaznykiv kariernykh samoskydiv [Optimization of work of metallurgical enterprise by analysis of operational indicators of career dump trucks]. *Matematychni modeliuvannia – Mathematical modeling*, 2, 163–169 [in Ukrainian].

## АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ КАР'ЄРА МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА Середа Б.П., Муковська Д.Я.

### Реферат

У цій статті проаналізовано основні аспекти функціонування цеху шлакопереробки металургійного підприємства «Запоріжсталь». Описані виробничі функції, структура, потужність цеху. Проаналізовано обсяг, структуру, основні виробничі показники цеху шлакопереробки 2016 - 2018 років. Представлені основні види та обсяги перероблених технологічних відходів. Показано доцільність їх використання у власному виробництві.

Металургійні шлаки є небажаними, але й неминучими на даний час продуктами діяльності металургійних підприємств. Метою переробки шлаків, в основному, є витяг металомістких, необхідних для основного металургійного виробництва. З'являється можливість реалізації переробленого фракційного шлаку споживачам для будівництва доріг та інших потреб, а також для звільнення площ для складування відходів. Це дозволяє знизити витрати на зберігання відходів, забезпечити виробництво вторинним металом і отримати додатковий дохід від продажу шлаку, переробленого в щебінь, пісок або інші будівельні матеріали. Аналізуючи сказане вище, можна зробити висновки, що використання технологічних відходів вирішує комплекс питань по зниженню техногенного навантаження на розташовані поблизу території, знижується потреба у первинній сировині, зменшується забруднення навколишнього середовища, скорочуються земельні площі накопичення технологічних відходів. Тому рециклінг технологічних відходів є доцільним не тільки з економічної, а і з екологічної точки зору.

Таким чином в умовах ПАТ «Запоріжсталь» функціонування цеху шлакопереробки дозволяє застосування заходів по рециклінгу технологічних відходів основного виробництва, які дозволяють частково розв'язати проблему дефіциту залізородної сировини та покращити екологічну ситуацію у регіоні.

### Література

1. Плотніков В. В. Перспективи утилізації промислових відходів у металургійному виробництві. *Вісник Криворізького національного університету. Технічні науки*. Кривий Ріг, 2012. № 3. С. 215–219.
2. Куатов Д. Б. Переработка шлака в черной металлургии путем дробления и извлечения дополнительного сырья. *Наука и техника Казахстана*. 2016. № 3. С. 88–90.
3. Середа Б. П., Муковська Д.Я. Заходи підвищення самоскидів в умовах кар'єру металургійного підприємства. *Вісник НТУ "ХП"*. *Технічні науки*. Харків, 2018. № 23. С. 62–66.
4. Рудь В.Д., Савюк І.В., Самчук Л.М., Повстяна Ю.С. Аналіз кількості утворених відходів машинобудування та металургії на території України. *Вісник ТНТУ. Технічні науки*. Тернопіль, 2015. № 3. С. 130–136.
5. Авраменко С. Х., Волох Ю.В. Екологічні проблеми від накопичення твердих промислових відходів та шляхи використання металургійних шлаків. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2010. № 35. С. 200–206.
6. Федюшко М. П. Стан промислових відходів міста Маріуполь та їх утилізація. *Вісник Аграрної науки Причорномор'я. Технічні науки*. Миколаїв, 2015. № 2. С. 187–195.
7. Середа Б. П., Муковська Д.Я. Дослідження ефективності роботи самоскидів БелАЗ в умовах кар'єру металургійного підприємства. *Перспективи технології та прилади*. 2018. № 13. С. 125–131.
8. Єгоров К. В. Аналіз відходів металургійного виробництва. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра*. 2010. С. 193–196.
9. Назюта Л.Ю., Смотров А.В., Губанова А.В., Корнев Г.В. Структура образования и рециклінг технологических отходов на металлургических предприятиях полного цикла. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2011. № 4. С. 44–54.

10. Котов Ю. Т. Аналіз утворення відходів металургійного виробництва і розробка методів їх повторного використання на ПАТ "Арселормітал Кривий Ріг". *Гірничий вісник. Технічні науки*. Кривий Ріг, 2012. № 95. С. 232–236.
11. Ніколаєнко К. В., Самойленко Н.А. Комплексне використання металургійних шлаків. *Збагачення корисних копалин*. 2016. № 3. С. 127–131. – URL.: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/151378>. (дата звернення: 02.11.2019).
12. Середа Б. П., Муковська Д.Я. Оптимізація роботи металургійного підприємства шляхом аналізу експлуатаційних показників кар'єрних самоскидів. *Математичне моделювання*. 2018. № 2. С. 163–169.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185070

UDC 621.785.5: 621.793.6

**I.V. Kruglyak**, Ph.D., Associate Professor, Doctoral Student, seredabp@ukr.net  
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## MODELING OBTAINING OF DIFFUSION LAYERS BY USING A COMPOSITE POWDER MATERIALS

*The process of modeling the production of alitized, titanium, siliconized, nickeled coatings is an effective method to increase the reliability and durability of machine parts, tools, and tooling due to the creation of protective layers on the surface of the machined parts that have a unique set of physicochemical properties.*

*One of the most efficient methods of the development covering, possessing high mechanical, physic and chemical characteristics is surface metal diffusion saturation using a composite powder materials.*

*The alloys based on copper served the source data for study. The diffusion method of the surface saturation from hard phase in active gas ambience on the basis of analysis of the requirements, presented to copper covering and the way of the metal saturation for defensive covering obtaining has been chosen. This method provides for high surface quality and it is the simplest and most suitable one in laboratory practice being well reproduced in production condition and it does not demand for special complex equipment while it's realizing.*

**Keywords:** composite saturating environment; thermodynamics; modeling; coatings.

*Процес моделювання отримання алюмінієвих, титанових, силіційованих, нікельованих покриттів є ефективним методом підвищення надійності та довговічності машинних деталей, інструментів за рахунок створення захисних шарів на поверхні оброблюваних деталей, які мають унікальний набір фізико-хімічних властивостей.*

*Одним з найбільш ефективних методів розробки захисних шарів, що володіють високими механічними, фізичними та хімічними характеристиками, є дифузійне насичення поверхні шарів із застосуванням композиційних порошкових матеріалів.*

*Сплави на основі міді слугували вихідними даними для вивчення. Метод дифузійного насичення поверхні із твердої фази в активному газовому середовищі на основі аналізу вимог, що пред'являються до дифузійного шару, та обрано спосіб насичення металу. Цей метод забезпечує високу якість поверхні, він є найпростішим і найбільш використовуваним у лабораторній практиці, добре відтворюється у виробничих умовах, і не потребує спеціального складного обладнання, реалізуючи його.*

**Ключові слова:** композиційні насичуючі середовища; термодинаміка; моделювання; покриття.

### Introduction

The choice of node construction material details development of friction while trying to get high performance characteristics is one of the base problems in machine building. The main aim is a selecting known and creating new materials, possessing optimum characteristics, providing necessary resources for a given node development of friction. Alongside with getting necessary working characteristics it is required to take into account the economic considerations minding market conditions.

In this connection it's important that for node material development of friction to be obtained from available undeficit components using technology, requiring standard equipment, high vacuum, cryogenic temperatures and expensive technologies.

While selecting node material development of friction it must be taken account their compatibility, especially it's property of dripping and the following edge fin those are connected with chemical affinity, proximity to constitution and value of parameter of crystal lattices. In more general form compatibility is understood as the ability of materials to provide the optimum parameters of the node

of friction at continuous exploitation, quickly adaptation to abrupt changes of the load, velocity and temperature under adverse conditions of lubricant.

#### **Analysis of recent research and publications**

In the article Kukhareva N.G., Galynska N.A., Petrovich S.N. [1], when considering the process of forming diffusion layers, usually attempt to trace this process using alloy state diagrams. At the same time, they proceed from the position that has become almost the rule that the formation of a layer on the diffusion isotherm follows an increase in the concentration of the diffusing element in the alloy system and obeys the laws of phase transformations. In this case, first the phases of the lower composition must occur, then the middle and finally the higher (pure or atomic diffusion theory) [1]. According to another theory (reaction diffusion theory), the formation of a diffusion layer can begin with the formation of a phase of higher or medium composition, past the stage of formation of a phase of the lower composition, if the thermodynamic conditions for the formation of these phases are more favorable than for the phases of the lower composition [1].

The large theoretical and experimental material available [2—8], which is based on the application of precision methods for the study of the phase and chemical compositions of the diffusion layer, convinces us that in many cases the practice of chemical-thermal treatment of the formation of the diffusion layer does not obey equilibrium conditions, intermittent and may begin with the formation of the phase of higher or middle composition. In this case, the structure of the diffusion layer is not equilibrium. Among the various factors affecting the mechanism of formation of a diffusion layer with non-equilibrium structure, the main ones are the initial conditions preceding the process of diffusion of elements into metal, which directly or indirectly depend on a number of physicochemical and kinetic saturation factors, especially significant when it comes to a multicomponent system the saturation presented in this study.

With the emergence of the theory of nonequilibrium systems, it became possible to influence the structure and properties of diffusion layers by changing the dynamics of the saturation process itself. By changing the composition of the saturating medium and the ratio of its components, it is possible to influence the system and thereby change the kinetics of the diffusion processes.

#### **Presenting main material**

In diffusion saturation, it is important to transfer the components to the surface through the saturated gas phase. Obtaining protective coatings is carried out under non-stationary temperature conditions, so chemical transport reactions are important.

Mechanical compression tests show that the role of the diffusion layer is not only limited by the surface protection functions of the specimens, but also has a significant effect on its bulk properties. Diffusion saturation of titanium and aluminum alloys increases the compressive strength by 52%.

The high propagation velocities of the combustion wave, together with the high temperature, determine the short synthesis times and high process performance. Typical linear combustion velocities are 0.5–5 cm/sec., and in some cases they can reach large values (up to 20 cm/sec.). Often, the synthesis reaction does not have time to complete in the wave itself, and a volumetric reaction and formation of the final structure of products behind the combustion front take place. But also such process proceeds quickly enough because of high combustion temperatures.

Copper alloys protection with their chemist-thermal processing appears to be not only perspective, but sometimes and the only possible way of the obtaining product having necessary complex working characteristics, with enlarged mechanical toughness, corrosion to stability, resistances to detritions and oxidation under high temperature while keeping main copper alloy quality that is high electrical and thermal conductivity. Saturation to surfaces alloys simultaneously with several elements has main the advantage it allows to obtain, as a rule, more essential improvement of characteristic surface layer [9].

On analysis reaction observation, taking place while chemical-thermal processing in mode of the heat spontaneous combustion of powdered mixture, as well as the results of experiments and metallographic examination, there has been got the scheme of the formation hardened layers on copper alloys. It is possible to divide this process into several stages conditionally. First, the reactionary mixture is warmed in a stove up to the temperature of ignition that is it passes so called stage of the inert heating. Then occurs the interaction between powder oxides chromium, aluminum, as well as molyb-

denum, aluminum and silicon, occurs at the same time temperature in a reactor increases up to a maximum value. It is a stage of the heat spontaneous combustion.

On the third stage – the stage of heating product if occurs leveling the temperature over the volume of the reactor. At this chase active atoms of silicon, molybdenum and the other elements begin diffuse into a substrate. On the following stage, the stage of isothermal endurances – further diffusion a growing of the covering occurs.

As a result of diffusion surface saturation in condition of self-propagation high-temperature synthesis alumina-silicon, titanium-silicon and alumina-molybdenum-silicon covering on copper alloy were obtained. Herewith, the maximum thickness covering was 10—65  $\mu\text{m}$ . The measurement of the geometric sizes of samples were conducted before and after the chemicalthermal processing.

The differences in quality of surfaces, as structure, phase, composition, micro hardness and contents doping elements in diffusion layer on alloys are defined by the temperature of the process, the time of the endurance and the composite saturating environment. The mode of the heat spontaneous combustion, characterized by small duration, is recommended to use instead of traditional ways of chemical-thermal processing alloys (nitration, chrome plating and others.).

Structure x-rays analysis has shown that except  $\delta$ -hard solution aluminum and nickel in alloy on base copper in diffusion layer there are following phases  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ ,  $\text{NiAl}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Stabildross of samples saturated with aluminum, silicon and nickel simultaneously, in many times exceeds the resistance to oxidation of the uncovered alloy. So, when testing during 12 ch weight up of diffusion-saturated samples is 6 times less. Microstructure of a diffusion layer after testing keeps column extended grain  $\delta$ -phases and a number of mechanical mixture phases, but the general depth of a layer is somewhat bigger. Presence refractory chemical compounds in diffusion layer such as  $\text{NiAl}$ , must promote increasing hot-resistance sample [10].

The influence of diffusion saturation aluminum, silicon and nickel on wear capability copper alloy was defined on a universal machine MI-1M in condition of dry friction and the swing under load 25 kg [11]. The following conditions of friction were accepted, meeting the usage terms of the nodes:  $V = 1,5$  m/s,  $P = 0,8$  MPa. The behavior of diffusion-saturated sample in condition of the wear-out test has shown perspectives of dopins surface as a method of increasing alloy wear capability. It gave possibility for normal working conditions of mechanism optimum thickness of the defensive covering on details, being subjected to wearing out is 0,02—0,09 mm. Using of mechanical tests on compression it is proved that the role of diffusion layer is not limited only a function of surfaces sample protection, but it influences essentially threedimensional characteristics. Diffusion saturation of alloy aluminum and nickel raises the limit to toughness at compression of 52 %.

Consequently, diffusion saturation alloy aluminum and nickel raises such characteristics of bronze and brasses, as stabildross, wear-out resistance and mechanical toughness, and can be used in the industry aiming increase of reliability and longevity of a copper product.

Research of reliability of mechanisms is proved in most cases quick wear-out of the details, made from bronze C62300 (the bushings, anything numbered six), occurs because of roughness of the associate detail. Most wear-out of the bronze details occurs at period of the wear-in, during which value break-in wear-out can form 60—70 % general tolerance for wear-out.

Research of the influence of the nickel covering on a wear-out sample ( $V = 2,5$  m/s,  $P = 1,0$  MPa) were made on installation for test material on detritions. As rear body was used the bar from fast-cut steel R6M5, hardened to hardness HRC 62—65. To two parties samples of 10 pieces each were subjected to the test: the first party was without covering, the second was with nickel and silicon covering by thickness 10—65  $\mu\text{m}$ . It was accepted that for criterion of the wear-out the ability process surfaces to exercised sample to resist to detrition, which was valued with a gap of time from the beginning of test before appearance of hits on diagram tape grapher, caused by process of grasp a material sample and rear body.

### Conclusions

As a result of physico-chemical modeling, it is established that the process of obtaining protective coatings is possible only if the solubility of the diffusing element in the metal and a sufficiently

high temperature that provides the necessary energy to the atoms. The possibility of chemical transport in the combustion wave is based on the fact that in the combustion process there is a consistent change of temperature modes and the temperature at each point of the mixture runs a series of continuous values from  $T_0$  to  $T_g$ . Thus, a non-stationary temperature process combined with chemical transport reactions can be used to obtain coatings.

Using nickel saturation of allows in 1,4—1,8 times raises wear capability a sample in consequence of reduction of the factor of friction. Herewith improve the steady-state factors to resistivity of the surfaces sample to detritions. The Analysis shows that using on sample of the nickel covering promotes increasing to reliability of the product as a whole. Thereby, executed studies point to perspective using silicon saturation and nickel saturation as a efficient tribotechnical covering. Herewith in process of the mechanical processing the details of the nodes of friction it is necessary to provide allow to come near for thickness of the inflicted covering.

### References

- [1] Kukhareva N.G., Galynskaya N.A., Petrovich S.N. *Investigation of the physicochemical properties of boride coatings on carbon steels* [Science - education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference], T.1. – Minsk: BNTU, 2013. P. 371
- [2] Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Galynskaya N.A., Protasevich V.F., Smirnova T.N. *Boroning of carbon and alloy steels in a fluidized bed* [Science and technology: international scientific and technical]. 2012. No.5. P. 8–12.
- [3] Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Galynskaya N.A. *The influence of thermal diffusion carbonitration conditions and the structure of diffusion coatings on the mechanical properties of tool steel P6M5* [Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal]. 2009. № 4. P.25–29.
- [4] Galynskaya N.A., Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Babul T., Obukhovich Z. *Study of the wear resistance of boride coatings obtained from composite powder media* [Science and technology: international scientific and technical journal]. 2012. No. 1. P. 10–16
- [5] Galynskaya N.A. Features of the technology for complex diffusion coatings based on boron and chromium. Prospects for the development of surface and volume hardening of alloys: a collection of scientific papers dedicated to the 40th anniversary of the Department of "Materials Science in Mechanical Engineering" ed. Voroshnina L.G; BNTU. Minsk, 2004 . P. 48–52.
- [6] Galynskaya N.A., Kukhareva N.G., Niss V.S., Petrovich S.N. *Features of the formation of boride coatings from composite metallothermal powder media* [Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal]. 2011. No. N 4. P.15–20.
- [7] Galynskaya N.A., Stasevich G.V. Comparative analysis of the characteristics of diffusion layers obtained in a "fluidized bed" and with traditional furnace heating. *Science–education, production, economics: materials of the 11th International Scientific and Technical Conference*. T.1. Minsk: BNTU, 2013. P. 372.
- [8] Galynskaya N.A., Kukhareva N.G., Petrovich S.N., Stasevich G.V. Hardening processing of dies for deep drawing. *Bulletin of the Belarusian National Technical University: scientific and technical journal*. 2010. No. 4.P. 30–34.
- [9] B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon'. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology. *TSM International 2010*. Seattle. USA 2010. P. 275.
- [10] B. Sereda, S. Sheyko Influence of preliminary preparation of surface on adhesive durability of coverings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. *10<sup>th</sup> International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. – Oxford, UK, 2008. P. 433–436
- [11] B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko. The Reception of Borized Coatings Eutectic Type on Steel in SHS–Conditions. *MST&T'08*. 2008. p. 1884 – 1889.

## МОДЕЛЮВАННЯ ОТРИМАННЯ ДИФУЗІЙНИХ ШАРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Кругляк І.В.

### Реферат

Процес моделювання виробництва алюмінієвих, титанових, силіційованих, нікельованих покриттів є ефективним методом підвищення надійності та довговічності машинних деталей, інструментів за рахунок створення захисних шарів на поверхні оброблюваних деталей, які мають унікальний набір фізико-хімічних властивостей. Одним з найбільш ефективних методів розробки захисних шарів, що володіють високими механічними, фізичними та хімічними характеристиками, є дифузійне насичення поверхні шарів із застосуванням композиційних порошкових матеріалів.

Найважливий великий теоретичний і експериментальний матеріал, який ґрунтується на застосуванні прецизійних методів дослідження фазового і хімічного складів дифузійного шару, переконує нас в тому, що у багатьох випадках практики хіміко-термічної обробки утворення дифузійного шару не підкоряється рівноважним умовам, а протікає переривчасто і може розпочатися з утворення фази вищого або середнього складу. Структура дифузійного шару в цьому випадку не є рівноважною. Серед різних чинників, що впливають на механізм формування дифузійного шару з нерівномірною структурою, головними є початкові умови, передуючі процесу дифузії елементів у метал, які прямо або побічно залежать від ряду фізико-хімічних і кінетичних чинників насичення, особливо значимих, якщо йдеться про багатокомпонентну систему насичення, представлену в цьому дослідженні.

Сплави на основі міді служили вихідними даними для вивчення. На основі аналізу вимог до дифузійного шару та обраного способу насичення металу обрано метод дифузії насичення поверхні від твердої фази в активному газовому середовищі. Цей метод забезпечує високу якість поверхні, і він є найпростішим і найбільш використовуваним у лабораторній практиці, добре відтворюється у виробничих умовах, і він не вимагає спеціального складного обладнання, реалізуючи його.

### Література

1. Кухарева Н.Г., Галынская Н.А., Петрович С.Н. Исследование физико-механических свойств боридных покрытий на углеродистых сталях. Наука – образованию, производству, экономике: *материалы 11-й Международной научно-технической конференции*. Т. 1. Минск: БНТУ. 2013. С. 371
2. Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Галынская Н.А., Протасевич В.Ф., Смирнова Т.Н. Борирование углеродистых и легированных сталей в кипящем слое. Наука и техника: *международный научно-технический журнал*. 2012. № 5. С. 8–12.
3. Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Галынская Н.А. Влияние условий термодиффузионной карбонитрации и структуры диффузионных покрытий на механические свойства инструментальной стали Р6М5. Вестник Белорусского национального технического университета: *научно-технический журнал*. 2009. № 4. С. 25–29.
4. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Бабуль Т., Обухович З. Исследование износостойкости боридных покрытий, полученных из композиционных порошковых сред. Наука и техника: *международный научно-технический журнал*. 2012. № 1. С. 10–16
5. Галынская Н.А. Особенности технологии получения комплексных диффузионных покрытий на основе бора и хрома. Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: *сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры "Материаловедение в машиностроении"* / под ред. Ворошникова Л.Г.; БНТУ. Минск, 2004. С. 48–52.
6. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Нисс В.С., Петрович С.Н. Особенности формирования боридных покрытий из композиционных металлотермических порошковых сред. Вестник Белорусского национального технического университета: *научно-технический журнал*. 2011. № 4. С. 15–20.



7. Галынская Н.А., Стасевич Г.В. Сравнительный анализ характеристик диффузионных слоев, полученных в «кипящем» слое и при традиционном печном нагреве Наука – образованию, производству, экономике: материалы 11-й Международной научно-технической конференции. Т. 1. Минск: БНТУ, 2013. С. 372.
8. Галынская Н.А., Кухарева Н.Г., Петрович С.Н., Стасевич Г.В. Упрочняющая обработка штампов для глубокой вытяжки. Вестник Белорусского национального технического университета: научно-технический журнал. 2010. №4. С. 30–34.
9. B. Sereda, A. Zherebtsov, Y. Belokon'. The Modeling and Processes Research of Titan Aluminides Structurization Received by SHS Technology. *TSM International 2010*. Seattle. USA 2010. P. 275.
10. B. Sereda, S. Sheyko Influence of preliminary preparation of surface on adhesive durability of coverings received in self-propagating high-temperature synthesis conditions. *10<sup>th</sup> International Conference on the Science and Technology of Adhesion and Adhesives*. – Oxford, UK, 2008. P. 433–436
11. B. Sereda, I. Kruglyak, S. Sheyko. The Reception of Borized Coatings Eutectic Type on Steel in SHS-Conditions. *MST&T'08*. 2008. p. 1884–1889.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185074

UDC 330.4:664

**H. Karimov**, candidate of Economic Sciences (Ph.D), associate professor, gkarimov@ukr.net

**K. Zvonarova**, postgraduate student, t4908802@gmail.com

Dniprovsk State Technical University, Kamianske

## MODELING OF THE FOOD INDUSTRY DEPENDENCE FROM RAW MATERIAL BASE

*Numerous working of livestock and agricultural processing industry production. The analytical dependence of indicators of activity of the food industry on the volume crops has been carried out, which forms the raw material base of the enterprises of the food and of production of the main types of products of the agrarian sector of the food complex of the region is obtained. The regression model of dependence of the food industry on the raw material base has been constructed and evaluated.*

**Keywords:** food industry; raw material base; livestock; plant growing; model.

*Виконано чисельну обробку обсягів виробництва продукції тваринництва та сільськогосподарських культур, що складає сировинну базу підприємств харчової та переробної промисловості. Отримано аналітичну залежність показників діяльності харчової промисловості від обсягу випуску основних видів продукції аграрного сектору продовольчого комплексу регіону. Побудовано та оцінено регресійну модель залежності харчової промисловості від сировинної бази.*

**Ключові слова:** харчова промисловість; сировинна база; тваринництво; рослинництво; модель.

### Problem Statement

In modern conditions is greatly enhanced by the orientation activity of the food complex the country's on comprehensive and complete satisfaction of the needs of the population in inexpensive and high-quality foods. Therefore, priority becomes the problem of effective functioning and further development of food industry, its industries and productions [1]. In turn, the main source of raw materials for the food industry is the production of agricultural sector (stock – breeding and crops – growing) within the region.

### Analysis of recent researches and publications

These issues dedicated to the works of many domestic and foreign scientists, who investigated problems of development of food complex, in particular, O. Alimov, P. Borschivsky, L. Deineko, Y. Izard, V. Kistanov, A. Lisetsky, N. Revutska, P. Sabluk, A. Palarchuk, O. Onyshchenko, Y. Fehyna, P. Heine and others [1–3]. But, despite the sufficiently complete description of the problem, some issues of building an adequate model of activity food complex under certain conditions are relevant and require further research.

### Formulating purpose of research

Usually, most of the tasks related to the construct of dependencies "phenomenon-factors" in the economy and management are resolved by means of mathematical statistics and relate to the processing of numerical data arrays under a specific procedure [4]. Standard mathematical provision of personal computers allows to significantly facilitate multidimensional statistical analysis. Methodic for using standard spreadsheet functions Excel for economic analysis are detailed described in many works, in particular [5]. Received in result processing numeric date of the regression equation describes the activity of the food complex (the dependence of the food industry from raw materials base).

As a result, the purpose of the study is to build analytical dependence of the results of the food industry from the structure of production of agricultural sector based on the data of previous periods.

### Stated of the main material

The level of production of gross domestic product both in absolute terms, and in relative (per capita) is one of the important macroeconomic indicators developments of the state and region. Important additional indicators are the structure and content in it of the gross domestic product of agriculture [3]. In modern conditions dominates the concept of "food complex", which includes the agrarian sector, food and processing industry population. The level of food consumption is certainly determined by the physical and economic availability for the

In market conditions is the main is factor of economic availability of food products. However, the level production of food and food raw materials for food and processing industry is not the last role [1]. In most statistical observations production of production of agricultural sector is divided into major animal products (meat, milk, eggs) and production of agricultural crops (grain and leguminous crops, sugar beet, sunflower, potatoes, crops vegetables, fruits and berries). Following the structure, the raw material base of the Dnipropetrovsk region food industry is characterized by indicators shown in tabl. 1.

Table 1. Pointers characterizing the raw material base of the food industry

Year	Raw material base								
	Production of animal products			Production of agricultural crops					
	meat, thsd. t.	milk, thsd. t.	eggs, mln. pcs.	grain and leguminous crops, thsd. c.	sugar beet, thsd. c.	sunflower, thsd. c.	potatoes, thsd. c.	crops vegetables, thsd. c.	fruits and berries, thsd. c.
2004	93,9	492,6	738,4	30567,9	4369,1	3587,7	6742	4986,7	1636,9
2005	118,4	494	881,3	29083,9	3586,3	6129,2	5835,3	4939	1661,2
2006	137,1	474,3	974,9	26352,7	5851,9	7651,3	5814,9	5251,2	784
2007	159,3	415,7	879,7	16718,5	1557,9	6176,5	3788,9	4693,1	1521,2
2008	184,8	381,4	904,1	36938,7	430,6	8514,4	5701,1	5411,7	1570,8
2009	197,0	359,2	955,6	28172,3	385,6	8284,6	4503,2	5544,8	1079,3
2010	207,4	339,8	998,2	27086,1	325,4	8555,1	4340,1	5602,8	1308,7
2011	225,9	341,7	1092,8	34560,9	825,6	10345,1	5615,8	6740,5	1567
2012	225,5	343,4	1093	15542,7	444,9	8029,3	4817,2	6716,4	1571,1
2013	227,4	348	954,5	37103,4	382,8	11728,2	5364	6000,1	1747,9
2014	224,5	357,2	1046,6	33178,4	285,5	9455	6589,5	7096,5	1330,7
2015	230,0	344,6	923,7	38662,4	313,8	11986,5	5602,7	7283,6	1454,7
2016	239,7	319,5	803,1	34808,1	541,9	12640,7	6020,9	7327,4	1494
2017	258,0	300,7	845,3	35784,3	550,8	12028,1	5678,1	7026,3	1413

Compiled on based on data [6—7]

Corresponding pointers characterizing the dynamics activate of food industry are given in tabl. 2.

As can be seen from tabl. 1 and 2, the resultant indication (production of foodstuffs, beverages and tobacco products) and factors (pointers of raw material base production) are presented in different units of measurement, which are not comparable to each other. In order to bring the pointers of production of animal products and agricultural crops into conformity with each other and with pointers of production of foodstuffs, beverages and tobacco products, it is necessary to convert them into a monetary look.

Table 2. Pointers characterizing the activate of food industry

Year	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Production of foodstuffs, beverages and tobacco products (thsd. UAH)	4012854,3	5461162,0	6210002,6	6991055,4	9321787,4	9971925,9	11565139,9	16578629,9	15651473,2	15955960,2	19688448,6	27376236,2	30871360,7	32383313,4

Compiled on based on data [8]

Bringing the pointers activate of the agricultural sector for the food complex to the unified dimension is carried out by multiplying the value of the pointer in a natural expression to the corresponding price of the unit of production (based to [9]), taking into account units of measurement (application the respective coefficients).

The results of bringing pointers characterizing the raw material base food industry of the region's to the only monetary measurement (in thousands of UAH) are shown in tabl. 3—5.

As a result, a numeric array of data that is suitable for further statistical processing is are in tabl. 6. The resultant indicator (production of foodstuffs, beverages and tobacco products) is marked by the letter Y. Factors (Pointers of production of animal products and agricultural crops), in the order of mention, marked with the letter X with index from 1 to 9.

To perform regression analysis we will use Excel built-in function “ЛИНЕЙН”.

The results of coefficients estimation for factors resultant indicator are grouped in tabl. 7.

Table 3. Pointers characterizing the raw material base in monetary look

Year	Raw material base								
	Production of animal products								
	meat			milk			eggs		
	thsd. t.	UAH per t.	thsd. UAH	thsd. t.	UAH per t.	thsd. UAH	mln. pcs.	UAH per thsd. pcs.	thsd. UAH
2004	93,9	4489,4	421554,7	492,6	952,5	469201,5	738,4	224,5	165770,8
2005	118,4	7002,3	829072,3	494	1253	618982,0	881,3	261,3	230283,7
2006	137,1	6294,6	862989,7	474,3	1187,4	563183,8	974,9	183,2	178601,7
2007	159,3	6576,6	1047652,4	415,7	1734,2	720906,9	879,7	257	226082,9
2008	184,8	10457,5	1932546,0	381,4	2332,2	889501,1	904,1	385,7	348711,4
2009	197,0	10769,7	2121630,9	359,2	2068,3	742933,4	955,6	402,4	384533,4
2010	207,4	10826,5	2245416,1	339,8	3195,6	1085864,9	998,2	452,4	451585,7
2011	225,9	11850,3	2676982,8	341,7	3165	1081480,5	1092,8	493,2	538969,0
2012	225,5	13715,9	3092935,5	343,4	2867,1	984562,1	1093	587,1	641700,3
2013	227,4	12976,2	2950787,9	348	3563,5	1240098,0	954,5	621,7	593412,7
2014	224,5	15635,8	3510237,1	357,2	3796,2	1356002,6	1046,6	740,6	775112,0
2015	230,0	20356,9	4682087,0	344,6	4402,4	1517067,0	923,7	1070	988359,0
2016	239,7	22851,3	5477456,6	319,5	5470	1747665,0	803,1	1021,2	820125,7
2017	258,0	30036,0	7749288,0	300,7	7517,3	2260452,1	845,3	1049,4	887057,8

Compiled on based on data [6—9]

Table 4. Pointers characterizing the raw material base in monetary look

Year	Raw material base								
	Production of agricultural crops								
	grain and leguminous crops			sugar beet			sunflower		
	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH
2004	30567,9	434,3	1327563,9	4369,1	132,8	58021,6	3587,7	1162,6	417106,0
2005	29083,9	402,6	1170917,8	3586,3	164,1	58851,2	6129,2	1012,2	620397,6
2006	26352,7	501,5	1321587,9	5851,9	184,5	107967,6	7651,3	960,1	734601,3
2007	16718,5	802,7	1341994,0	1557,9	158,1	24630,4	6176,5	1820,3	1124308,3
2008	36938,7	728,8	2692092,5	430,6	184,3	7936,0	8514,4	1534,5	1306534,7
2009	28172,3	758,8	2137714,1	385,6	476,3	18366,1	8284,6	1934,9	1602987,3
2010	27086,1	1039,5	2815600,1	325,4	330,2	10744,7	8555,1	2950,9	2524524,5
2011	34560,9	1327,2	4586922,6	825,6	413,7	34155,1	10345,1	3275,2	3388227,2
2012	15542,7	1562	2427769,7	444,9	371,7	16536,9	8029,3	3594	2885730,4
2013	37103,4	1279,9	4748864,2	382,8	430,4	16475,7	11728,2	2971,6	3485151,9
2014	33178,4	1828,2	6065675,1	285,5	492,8	14069,4	9455	3920,2	3706549,1
2015	38662,4	2733,5	10568367,0	313,8	672,9	21115,6	11986,5	7413,9	8886671,2
2016	34808,1	3317,3	11546891,0	541,9	803,6	43547,1	12640,7	8462,4	10697066,0
2017	35784,3	3733,8	13361141,9	550,8	941,4	51852,3	12028,1	8874,5	10674337,3

Compiled on based on data [6—9]

Table 5. Pointers characterizing the raw material base in monetary look

Year	Raw material base								
	Production of agricultural crops								
	potatoes			crops vegetables			fruits and berries		
	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH	thsd. c.	UAH per t.	thsd. UAH
2004	6742	531,2	358135,0	4986,7	1658,6	827094,1	1636,9	1369,9	224238,9
2005	5835,3	654	381628,6	4939	2355,2	1163233,3	1661,2	1503,2	249711,6
2006	5814,9	1404,5	816702,7	5251,2	2536	1331704,3	784	2395,6	187815,0
2007	3788,9	1111,7	421212,0	4693,1	2832,9	1329508,3	1521,2	1407,8	214154,5
2008	5701,1	1294,6	738064,4	5411,7	3477,8	1882081,0	1570,8	3190,9	501226,6
2009	4503,2	1826,8	822644,6	5544,8	3088,4	1712456,0	1079,3	3812,6	411493,9
2010	4340,1	2330,7	1011547,1	5602,8	4069,8	2280227,5	1308,7	3428,2	448648,5
2011	5615,8	2545,1	1429277,3	6740,5	2817,5	1899135,9	1567	4250,2	666006,3
2012	4817,2	1256,3	605184,8	6716,4	2771,7	1861584,6	1571,1	4796,1	753515,3
2013	5364	2321	1244984,4	6000,1	2948,6	1769189,5	1747,9	5115,2	894085,8
2014	6589,5	3408,1	2245767,5	7096,5	3482,6	2471427,1	1330,7	6003	798819,2
2015	5602,7	3330,9	1866203,3	7283,6	5894,4	4293245,2	1454,7	6651,4	967579,2
2016	6020,9	2864,1	1724446,0	7327,4	6002,2	4398052,0	1494	6886,6	1028858,0
2017	5678,1	3788,2	2150977,8	7026,3	6602,1	4638833,5	1413	7984,7	1128238,1

Compiled on based on data [6—9]

Table 6. Numeric array of data

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
1	421554,7	469201,5	165770,8	1327563,9	58021,6	417106,0	358135,0	827094,1	224238,9	4012854,3
2	829072,3	618982,0	230283,7	1170917,8	58851,2	620397,6	381628,6	1163233,3	249711,6	5461162,0
3	862989,7	563183,8	178601,7	1321587,9	107967,6	734601,3	816702,7	1331704,3	187815,0	6210002,6
4	1047652,4	720906,9	226082,9	1341994,0	24630,4	1124308,3	421212,0	1329508,3	214154,5	6991055,4
5	1932546,0	889501,1	348711,4	2692092,5	7936,0	1306534,7	738064,4	1882081,0	501226,6	9321787,4
6	2121630,9	742933,4	384533,4	2137714,1	18366,1	1602987,3	822644,6	1712456,0	411493,9	9971925,9
7	2245416,1	1085864,9	451585,7	2815600,1	10744,7	2524524,5	1011547,1	2280227,5	448648,5	11565139,9
8	2676982,8	1081480,5	538969,0	4586922,6	34155,1	3388227,2	1429277,3	1899135,9	666006,3	16578629,9
9	3092935,5	984562,1	641700,3	2427769,7	16536,9	2885730,4	605184,8	1861584,6	753515,3	15651473,2
10	2950787,9	1240098,0	593412,7	4748864,2	16475,7	3485151,9	1244984,4	1769189,5	894085,8	15955960,2
11	3510237,1	1356002,6	775112,0	6065675,1	14069,4	3706549,1	2245767,5	2471427,1	798819,2	19688448,6
12	4682087,0	1517067,0	988359,0	10568367,0	21115,6	8886671,2	1866203,3	4293245,2	967579,2	27376236,2
13	5477456,6	1747665,0	820125,7	11546891,0	43547,1	10697066,0	1724446,0	4398052,0	1028858,0	30871360,7
14	7749288,0	2260452,1	887057,8	13361141,9	51852,3	10674337,3	2150977,8	4638833,5	1128238,1	32383313,4

Table 7. The results of coefficients estimation

Factor		Coefficient		Standard value errors
marked	name	marked	value	
X1	meat	k1	1,275852	0,781221
X2	milk	k2	-2,27146	3,494836
X3	eggs	k3	2,773841	5,172413
X4	grain and leguminous crops	k4	-0,87669	0,529605
X5	sugar beet	k5	-6,91482	14,30335
X6	sunflower	k6	2,409149	0,646382
X7	potatoes	k7	3,403518	1,374676
X8	crops vegetables	k8	-0,79708167	1,298809493
X9	fruits and berries	k9	3,890614704	4,12816942
	Free member	b	3618226	2567507

That is, received the regression model of the dependence of the volume of production of foodstuffs, beverages and tobacco products from volumes of production of animal products and agricultural crops is as follows:

$$Y = 1,275852 * X1 - 2,27146 * X2 + 2,773841 * X3 - 0,87669 * X4 - 6,91482 * X5 + 2,409149 * X6 + 3,403518 * X7 - 0,79708167 * X8 + 3,890614704 * X9 + 3618226.$$

#### Conclusions and prospects for further research

The standard errors values for the coefficients are within allowable limits (special attention should be paid to the estimation of factor X5 – production of sugar beet). The coefficient of determinants is close to 1 (0.997648473), which indicates a sufficiently full correlation of the model with data [10]. The standard error for assessing the resultant indicator is 824 thousand. UAH. Deviation of the settlement value of the volume of production of foodstuffs, beverages and tobacco products from the actual amounted to 104743.7 thousand. UAH. or 0.32345 percent. All this indicates the adequacy of the obtained model and the possibility of its further use for the purpose of forecasting or assessing the degree of influence of factors.

From the resulting equation can be seen that the factors X1-production of meat, X3-production of egg, X6-production of sunflower, X7-production of potatoes, X9-production of fruit and berry crops positively affects in the volume of food products. At the same time, the dynamics of factors X2-production of milk, X4-production of grain and leguminous crops, X5-production of sugar beet and X8 -production of crops vegetable generates a negative trend.

Further investigations can be connected both with refine data (refine your model, taking into account additional factors) and using the obtained model for the purposes of forecasting and programming of food industry in the region.

### References

- [1] Koreniuk, P.I. (2009). *Ефективність використання у виробництва природно-ресурсного потенціалу: фінансові фактори, домінуючі тенденції* [Efficiency of use and reproduction of natural resource potential: financial factors, dominant tendencies]. Dnepropetrovsk: DDFA [in Ukrainian].
- [2] Deineko, L.V. (2008). *Розвиток харчової промисловості в умовах ринкових перетворень: проблеми теорії і практики* [The development of the food industry in the context of market transformations: problems of theory and practice]. Kyiv: Znannia [in Ukrainian].
- [3] Tracy M. (1995). *Сільське господарство у промислово розвинутих країнах* [Agriculture and food in the economy of developed countries]. (A. Sutskiy, Trans). Saint Petersburg: Ekonomicheskaya shkola [in Russian].
- [4] Eddowes, M. & Stansfield, R. (1997). *Методи прийняття рішень* [Methods of decision making]. (Trans). Moscow: UNITI [in Russian].
- [5] Avramenko, V. I. & Karimov, I. K. (2013). *Теорія ймовірностей і математична статистика* [Theory of chances and mathematical statistics]. (2nd ed., rev.). Dniprodzerzhynsk: DDTU [in Ukrainian].
- [6] Holovne upravlinnia statystyky u Dnipropetrovskii oblasti. Ofitsiyni veb-sait. Statystychna informatsiia. Silske, lisove ta rybne hospodarstvo. Roslynnytstvo (1995-2018 roky) [Main administration of statistics is in the Dnipropetrovsk region. Official web site. Statistical information. Agriculture, forestry and fisheries. Crop production (1995-2018)]. [dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg6.pdf](http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg6.pdf) Retrieved from <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg6.pdf> [in Ukrainian].
- [7] Holovne upravlinnia statystyky u Dnipropetrovskii oblasti. Ofitsiyni veb-sait. Statystychna informatsiia. Silske, lisove ta rybne hospodarstvo. Tvarynytstvo (1995-2018 rr) [Main administration of statistics is in the Dnipropetrovsk region. Official web site. Statistical information. Agriculture, forestry and fisheries. Livestock breeding (1995-2018)]. [dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg7-8.pdf](http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg7-8.pdf) Retrieved from <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg7-8.pdf> [in Ukrainian].
- [8] Holovne upravlinnia statystyky u Dnipropetrovskii oblasti. Ofitsiyni veb-sait. Statystychna informatsiia. Promyslovisht. Obsiah realizovanoi promyslovoi produktsii (tovariv, posluh) za vydamy ekonomichnoi diialnosti [Main administration of statistics is in the Dnipropetrovsk region. Official web site. Statistical information. Industry. Volume of sold industrial products (goods, services) by types of economic activity]. [dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/p/2018/p14.pdf](http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/p/2018/p14.pdf) Retrieved from <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/p/2018/p14.pdf> [in Ukrainian].
- [9] Holovne upravlinnia statystyky u Dnipropetrovskii oblasti. Ofitsiyni veb-sait. Statystychna informatsiia. Silske, lisove ta rybne hospodarstvo. Seredni tsyny produktsii silskoho hospodarstva, realizovanoi pidpriemstvamy (1996-2018 rr) [Main administration of statistics is in the Dnipropetrovsk region. Official web site. Statistical information. Agriculture, forestry and fisheries. Average prices of agricultural products sold by enterprises (1996-2018)]. [dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2019/sg10.pdf](http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2019/sg10.pdf) Retrieved from <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2019/sg10.pdf> [in Ukrainian].
- [10] Taha, Hamdy A. (2001). *Введення в дослідження операцій* [Operations research an introduction]. (6nd ed., rev.). (Trans). Moscow: Yzdatelskyi dom "Vyliams" [in Russian].

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ВІД СИРОВИННОЇ БАЗИ

Карімов Г.І., Звонарьова К.А.

В сучасних умовах перебудови промислових галузей економіки України та її регіонів, значно посилюється орієнтація їх діяльності на всебічне і повне задоволення потреб населення в товарах народного споживання, в першу чергу в недорогих і високоякісних харчових продуктах. Тому, пріоритетною стає проблема ефективного функціонування і подальшого розвитку харчової промисловості, її галузей та виробництв. Проблема ефективного функціонування і розвитку харчової промисловості тісно пов'язана із діяльністю аграрного сектору продовольчого комплексу регіону, оскільки його продукція є сировинною базою для підприємств харчової та переробної галузі. Незважаючи на достатньо повний опис проблеми вітчизняними та зарубіжними вченими, питання побудови адекватної моделі діяльності продовольчого комплексу в певних умовах, є актуальними та потребують подальших досліджень.

Мета дослідження — побудова аналітичної залежності результатів діяльності харчової промисловості від структури випуску продукції аграрного сектору на основі даних минулих періодів.

В загальному випадку виробництво продукції аграрного сектору поділяють на продукцію тваринництва (м'ясо, молоко, яйця) та виробництво сільськогосподарських культур (культури зернові та зернобобові, буряк цукровий, соняшник, картопля, культури овочеві, культури плодові та ягідні). Дана структура випуску продукції сировинної бази харчової промисловості Дніпропетровської області за 2004—2017 роки врахована чинниками, що впливають на значення обсягу виробництва харчових продуктів, напоїв і тютюнових виробів. Натуральні показники переведено у вартісні з урахуванням єдиної одиниці виміру — тисячі гривень.

В отриманій регресійній моделі стандартні значення помилок коефіцієнтів знаходяться у допустимих межах. Але слід звернути увагу на оцінку п'ятого чинника — виробництво буряка цукрового. Коефіцієнт детермінованості склав 0,998, що вказує на достатньо повну кореляцію моделі. Відхилення розрахункового значення обсягу виробництва харчової промисловості від фактичного склало 104743,7 тис. грн. або 0,32 відсотки. Можливо зробити висновок про адекватність отриманої моделі та можливість її подальшого використання для цілей прогнозування або оцінки ступеню впливу чинників.

Подальші дослідження можуть бути пов'язані з уточненням моделі, врахуванням додаткових факторів, використанням отриманої моделі для цілей прогнозування та програмування розвитку харчової промисловості регіону.

### Література

1. Коренюк П.И. Эффективность использования и воспроизводства природно-ресурсного потенциала: финансовые факторы, доминирующие тенденции: монография. Днепропетровск: ДДФА, 2009. 120 с.
2. Дейнеко Л.В. Развитие харчової промисловості в умовах ринкових перетворень: проблеми теорії і практики. монографія. Київ: Знання, 1999. 331 с.
3. Трейси М. Сельское хозяйство и продовольствие в экономике развитых стран / ред. А.Г. Суцкий; пер. с англ. Санкт-Петербург: Экономическая школа, 1995. 431 с.
4. Эддоус М., Стенсфилд Р. Методы принятия решений. / пер. с англ. Москва: ЮНИТИ, 1997. 590 с.
5. Авраменко В.І., Карімов І. К. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. посібник. Вид.2-ге, перероб. і доп. / Дніпровський держ. тех.ун-т. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2013. 247 с.
6. Рослинництво (1995-2018 роки) (за даними головного управління статистики у Дніпропетровській області). URL: [http://dnepstatat.gov.ua/statinfo% 202015 /sg /2018/sg6.pdf](http://dnepstatat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg6.pdf) (дата звернення: 19.03.2019).



7. Тваринництво (1995-2018pp.) (за даними головного управління статистики у Дніпропетровській області). URL: <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2018/sg7-8.pdf> (дата звернення: 19.03.2019).
8. Обсяг реалізованої промислової продукції (товарів, послуг) за видами економічної діяльності (за даними головного управління статистики у Дніпропетровській області). URL: <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/p/2018/p14.pdf> (дата звернення: 19.03.2019).
9. Середні ціни продукції сільського господарства, реалізованої підприємствами (1996-2018pp.) (за даними головного управління статистики у Дніпропетровській області). URL: <http://dneprstat.gov.ua/statinfo%202015/sg/2019/sg10.pdf> (дата звернення: 19.03.2019).
10. Таха Хемди А. Введение в исследование операций. Изд. 6-е / пер. с англ. Москва: Издательский дом "Вильямс", 2001. 912 с.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185084

UDC 621.333:519.87

**O.I. Sheremet**, Doctor of Tech. Sc., Associate Professor, sheremet-oleksii@ukr.net

**N.V. Klimchenkova**, Candidate of Tech. Sc., Associate Professor, klimchenkova.nat34@gmail.com  
Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk

**O.V. Sadovoi**, Doctor of Tech. Sc., Professor, sadovoyav@ukr.net

**Yu.V. Sokhina**, Candidate of Tech. Sc., Associate Professor, elm@dstu.dp.ua  
Dniprovsk State Technical University, Kamyanske

## DEVELOPMENT OF THE MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATION OF UNSTABLE TEMPERATURE-MECHANICAL STRESSES IN THE TRACTION MOTOR

*The article deals with the issues of calculation of unsteady temperature-mechanical stresses in the collectors of traction electric motors for technological and operational modes, which contributes to increasing the reliability and competitiveness of domestic electric locomotives.*

*The results of the theoretical study of the distribution of the temperature-mechanical forces in the traction motor's collectors are carried out for the most dangerous heavy transient modes, which include: dynamic formation of the collector at high temperature at an increased frequency of rotation; test of the engine produced at an increased frequency of rotation; start of the engine under load in nominal mode or at maximum load, limited class of insulation resistance of the collector.*

*The most research results are obtained for the process of manufacturing collectors of traction electric motors of main electric locomotives, but they can also be used for the technology of manufacturing electric machines for direct current with other operational purposes.*

**Keywords:** collector; traction electric motor; unsteady parameters; temperature-mechanical stresses.

*У статті розглянуті питання розрахунку несталих температурно-механічних напружень у колекторах тягових електродвигунів для технологічних та експлуатаційних режимів, що сприяють підвищенню надійності та конкурентоспроможності вітчизняних електровозів.*

*Результати теоретичного дослідження розподілу температурно-механічних зусиль у колекторах тягових електродвигунів проведені для найбільш небезпечних важких перехідних режимів, до яких відносять: динамічне формування колектору при високій температурі на підвищеній частоті обертання; випробування виготовленого двигуна при підвищеній частоті обертання; пуск двигуна під навантаженням у номінальному режимі або при максимальному навантаженні, обмеженому класі нагрівостійкості ізоляції колектору.*

*Більшість результатів досліджень отримано для процесу виготовлення колекторів тягових електродвигунів магістральних електровозів, але вони можуть бути також використані до технології виготовлення електричних машин постійного струму з іншим експлуатаційним призначенням.*

**Ключові слова:** колектор; тяговий електродвигун; несталі параметри; температурно-механічні напруження.

### Formulation of the problem

The comprehensive program of updating of the railway rolling stock of Ukraine for the years 2008—2025, which was put into effect by the order of the Ministry of Transport and Communications No. 12559 of October 14, 2008, is aimed at the production and updating of own powerful electric locomotives and requires reliable traction motors.

According to [1] 50% of all failures of traction motors (TM) accounted for the main electric collector where significant influence unsteady temperature and mechanical forces both in technology and in operating conditions. The method of calculation and identification unsteady temperature fields and temperature and mechanical stress in the elements of modern collectors TM acquired at present of particular relevance.

Collectors of TMs are operating under different fluctuations of electrical and mechanical loads in ambient temperature changes from  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Initial mechanical stresses caused by tighten-

ing the collector with bolts or other fasteners are created during collection. Temperature mechanical stresses occur when carrying out the operations of a technological process for the production of TMs, during tests, in operating modes and due to the difference in temperature and coefficients of temperature expansion of the elements, the presence of structural links between the elements, which prevent the free change of their sizes. Temperature mechanical stresses are superimposed on mechanical stresses from the tightening forces and centrifugal forces that occur when the collector is rotated, significantly reducing the initial safety margin of the structure.

It is difficult to experimentally determine the effect of temperature and mechanical stress on the operation of TM over a period of time. Therefore, it is advisable to develop a mathematical model for the calculation of constant temperature-mechanical stresses in the collector of the traction motor.

#### **Analysis of recent research and publications**

According to available data [1—4], in severe transient modes, the temperature stresses can increase by 20—30% the magnitude of mechanical stresses that occurred in the collector elements at the beginning of the mode. This significantly affects the reliability of the collector and traction motors installed on the main electric locomotives.

The factors that characterize the thermal and mechanical strength of the collectors include: the rated power of the engine, relative to the area of the working surface of the collector; specific losses of ventilating air; specific power losses on the collector work surface; power losses per unit mass of copper of the collector circular arch; current density in brushes; maximum circumferential velocity of the collector work surface; excess temperature of the structural elements above the temperature of the ventilating air; the coefficient of increase of the primary efforts in the elements of the collector due to the change in its temperature state.

The analysis of the above factors for TM in recent years showed that during this period of time the intensity of operation of main electric locomotives has increased by 2—3 times [1, 2, 4]. The above points out, that the issues of research and calculation of temperatures and temperature-mechanical stresses in the collectors of modern TMs have received important theoretical and practical importance in terms of the operational reliability of the collectors.

Analyzing existing methods of calculating temperatures and temperature and mechanical stress in the collectors of electrical machines include the following features:

1. In most scientific works, only constant temperature-mechanical stresses are calculated or the coefficient of increase of mechanical stresses due to temperature influence is recommended.

2. In the known scientific works, the calculation of average temperature exceedances of copper or copper and collector steel in steady state is calculated, for transient modes, the excess copper temperature is expressed for heating a homogeneous body, or it is recommended to use thermal circuits of substitution; there is no ambiguity in the approach to determining the area of heat transfer surfaces and the magnitudes of heat transfer coefficients.

3. Calculation of only constant temperatures and temperature-mechanical stresses in the elements of the collector cannot fully ensure the operational reliability of the TM collectors, the elements of which are influenced by the considerable temperature efforts in the transient modes of production, testing and operation, when the greatest differences between copper and steel temperatures occur.

#### **Formulation of research objectives**

The purpose of the work is to develop a methodology for calculating and identifying of temperature fields and temperature-mechanical stresses in TM collectors under non-constant modes.

According to the purpose in the work the following tasks are set and solved:

– sequence of calculation of temperature mechanical stresses and temperatures under non-constant modes is proposed;

– theoretical studies of the distribution and change of temperatures and temperature-mechanical stresses in the elements of TB collectors in non-constant modes have been carried out;

– a system for identification of temperature-mechanical stresses was developed and recommendations for their reduction were given.

The object of the study — the processes of occurrence of temperature-mechanical stresses.

The subject of the study — the identification and analysis of the distribution of temperature-mechanical forces and their influence on the state of the TM collector elements design.

### Presentation of basic material

The collector is a complex system of a large number of structurally related solids, for each of which the heat transfer processes are described by differential thermal conductivity equations [3, 4].

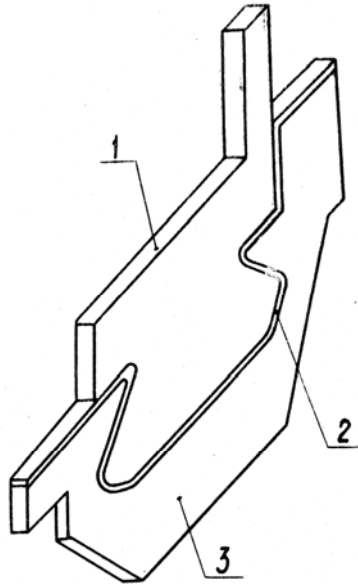


Fig. 1. Settlement sector of collector with insulating cuffs: 1 — collector plate; 2 — case insulation; 3 — case

Thus, the thermal processes in the collector will be described by a large number of differential thermal conductivity equations and equations describing the boundary and initial conditions of each of the bodies. However, the geometric symmetry of the design can greatly simplify the thermal calculation of the collector and increase its accuracy. For this purpose, the design sector is distinguished from the structure, which includes the volume of the collector, which belongs to the collector division [2, 3]. The volume of the sector includes three bodies with the same thermophysical properties within each of them: the collector plate, part of the body insulation, part of the case. This simplifies the calculation task.

Fig. 1 simplifies the calculation sector of the collector with insulating cuffs. The basic assumption adopted by the thermal calculation selected sector is the lack of heat in the direction of neighboring sectors, as all sectors are experiencing the same collector thermal influences. Loss of power, leading to the estimated body heat sector are determined by dividing the total power losses on the working surface of the collector ( $\Delta P_{mp} + \Delta P_e$ ) on the number of collector plates. Since

power losses are concentrated in a very thin layer near the working surface (in the area of alternating brush — collector), they can be considered as surface heat sources and are included in the equation for the boundary conditions of the collector plate [2, 3].

Experimental studies have found that it is possible to consider a one-dimensional temperature field and to determine only the change in temperature along the radius of the collector. The effect of the armature winding on the temperature distribution of the collector can be accounted by a corresponding increase in the total power loss on the collector. Fig. 2 shows a calculation scheme of thermal processes in the collector sector, based on which a mathematical model of thermal processes can be represented as a system of three differential equations of thermal conductivity in partial derivatives with boundary and initial conditions.

For the collector plate the differential heat equation is as follows:

$$\lambda_1 \frac{\partial^2 \Theta_1(x, t)}{\partial x^2} = c_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{\partial \Theta_1(x, t)}{\partial t}, \quad 0 \leq x \leq \delta_1, \quad t > 0, \quad (1)$$

where  $\lambda_1$  — thermal conductivity of the material of the plate, W / (m · °C);  $c_1$  — specific heat of the material W·s/(kg·°C);  $\rho_1$  — density of material, kg/m<sup>3</sup>;  $\Theta_1(x_1, t)$  — the required function of distribution of excess temperatures by the height of the plate for any time, °C;  $\delta_1$  — height of the plate (radial size), m.

For the case insulation

$$\lambda_2 \frac{\partial^2 \Theta_2(x, t)}{\partial x^2} = c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{\partial \Theta_2(x, t)}{\partial t}, \quad \delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2, \quad t > 0, \quad (2)$$

where  $\lambda_2$ ,  $c_2$ ,  $\rho_2$  — accordingly, the coefficient of thermal conductivity, specific heat and density of the material of the case insulation;  $\Theta_2(x, t)$  — the required function of distribution of excess temperatures on the thickness of the case insulation layer, °C;  $\delta_2$  — thickness of the layer (radial size) of the case insulation, m.

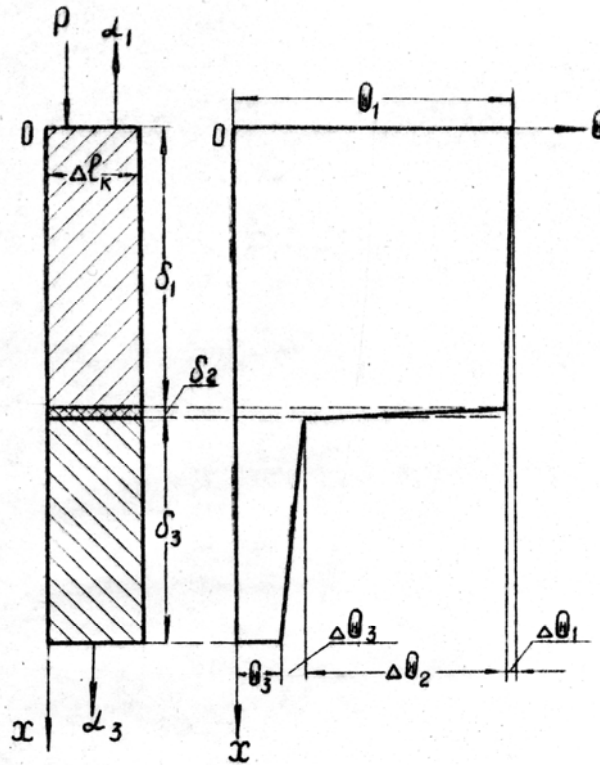


Fig. 2. Calculation scheme of thermal processes in the collector sector and relative change in temperature over the radius

For the case

$$\lambda_3 \frac{\partial^2 \Theta_3(x, t)}{\partial x^2} = c_3 \cdot \rho_3 \cdot \frac{\partial \Theta_3(x, t)}{\partial t}, \quad \delta_1 + \delta_2 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad t > 0, \quad (3)$$

where  $\lambda_3$ ,  $c_3$ ,  $\rho_3$  — accordingly, the coefficient of thermal conductivity, specific heat and density of the case material;  $\Theta_3(x, t)$  — the required function of temperature distribution over radial size of the case, °C;  $\delta_3$  — the radial size of the collector body.

The boundary conditions for the contact layer and the heat transfer layer are as follows:

$$P - \alpha_1 \cdot (\partial \Theta_1(x, t) - \Theta_0) = -\lambda \frac{\partial \Theta_1(x, t)}{\partial t}, \quad x = 0; \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial \Theta_1(x, t)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(x, t)}{\partial x}, \quad \Theta_1(x, t) = \Theta_2(x, t), \quad x = \delta_1; \quad (5)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial \Theta_2(x, t)}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial \Theta_3(x, t)}{\partial x}, \quad \Theta_2(x, t) = \Theta_3(x, t), \quad x = \delta_1 + \delta_2; \quad (6)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial \Theta_3(x, t)}{\partial x} = \alpha_3 (\Theta_3(x, t) - \Theta_0), \quad x = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3, \quad (7)$$

where  $P$  — specific power losses on the working surface of the collector plate, W/m<sup>2</sup>;  $\alpha_1$  — plate heat transfer coefficient, W/(m<sup>2</sup>·°C);  $\alpha_3$  — coefficient of heat transfer surface of the body, W/(m<sup>2</sup>·°C);  $\Theta_0$  — exceeding the temperature of the cooling air collector, °C.

Initial conditions for the bodies of the settlement sector:

$$\Theta_1(x, t) = \Theta_2(x, t) = \Theta_3(x, t) = \Theta_{init}, \quad t = 0, \quad (8)$$

where  $\Theta_{init}$  — the initial excess of the temperature of the sector bodies, °C.

Due to thermal parameters of materials, mathematical model of thermal processes can be simplified. Since the coefficients of thermal conductivity of the collector copper and steel of the case are more than 100 times greater than the coefficient of thermal conductivity of the body insulation (cuffed mica), their value can be considered infinitely large ( $\lambda_1 = \lambda_3 = \infty$ ). Physically, this means that the temperature of the plate and the case is almost unchanged in the radius of the collector. The heat capacity of the case insulation layer is assumed to be zero compared to the heat capacity of the plate and the body, since the thickness of this layer is 20—30 times smaller than the height of the plate ( $\delta_1$ ) and the radial size of the case ( $\delta_3$ ). Accepted assumptions lead to a simplification of the system of equations. The influence of the heat capacity of the plate and the case on the change in the temperature field in a non-constant thermal process is taken into account by introducing these quantities into boundary conditions for the layer of body insulation. Accept  $\Theta_0 = 0$  that practically takes place.

Then the desired function of the distribution of excess temperature over the thickness of the insulation layer:

$$\Theta_2(x, t) = \frac{1}{\lambda_2} \left( -P + \alpha_1 \left( C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} - \frac{a_0}{a_1} \right) - C_1 \rho_1 \delta_1 (C_1 k_1 e^{k_1 t} + C_2 k_2 e^{k_2 t}) \right) \cdot x + C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} - \frac{a_0}{a_1}. \quad (9)$$

The resulting expression (9) contains the parameters of the design and the thermal process, allows to calculate the distribution of temperature changes in layer thickness of hull insulation ( $0 \leq x \leq \delta_2$ ) for any point in time unsteady thermal process. Using the obtained expression, it is possible to determine the average excess temperature of copper of the circular arch of the collector at  $x = 0$ , since this value of abscissa corresponds to the limit of contact of the plate with the case insulation. The average excess temperature of the collector case is obtained from (9) at  $x = \delta_2$ , since this value of the abscissa corresponds to the limit of contact of the case with the case insulation. Thus, for any moment of time of a non-constant thermal process in accordance with (9), the excess temperature of the elements of the collector structure is determined. The steady-state temperatures of the collector elements, as the final state of the non-constant temperature field at the given mode parameters, can be obtained from (9) at  $t = \infty$ . The presence of temperature-time dependencies for the elements of the collector allows proceeding to the calculation of non-constant temperature mechanical stresses in the structural elements.

The mathematical model of the collector thermal processes, given in the form of the system of equations (1)—(8), can be interpreted by means of thermal substitution schemes. The main provisions of the thermal substitution circuit method are set out in the known literature [1, 2, 4] and are used in thermal calculations of electric machines. The essence of the thermal substitution circuit is that heat from the concentrated sources of thermal energy through the concentrated thermal supports is diverted to the cooling electric machine of the air. The sampling of the collector temperature field and the transition to temperature distributions of the same magnitude within some body volumes allow the partial differential equations to be replaced by partial first-order differential equations for non-constant modes and a system of linear algebraic equations for steady-state modes.

**The assumptions used in developing the thermal equivalent circuit.** Development of thermal equivalent circuit collector held under such conditions and assumptions [1, 2, 4]:

1. The settlement sector of the collector is divided into volumes within which the thermophysical properties of the materials are the same, and the distribution of parameters in these volumes is replaced by concentrated supports, while maintaining thermal bonds between them.

2. To account for the effect of the armature on the temperature distribution, the collector armature is allocated in the collector, which includes the volume belonging to one collector division and has a thermal connection to the collector by the copper winding of the armature.

3. Power losses on the collector work surface and in the armature are represented as concentrated sources of thermal energy. It is possible to take into account the effect of the armature on the temperature distribution in the collector by correspondingly increasing the power loss on the collector work surface. There is no heat transfer between the selected settlement sector and the rest of the col-

lector. The linear law of change of excess of cooling air temperature along the length of electric machine is adopted.

4. Thermal resistances of heat transfer from the collector surfaces and resistances during heat transfer by thermal conductivity are determined according to the expression given in [1—4]. When calculating the unsteady temperature field of a collector, the initial temperature distribution by design element is determined, and the concentrated heat capacities of the volumes into which the calculated sector is divided are taken into account.

The temperature-time dependencies of the collector elements when using thermal substitution schemes are in good agreement with the calculated analytical method, which allows the use of the collector substitution scheme for further calculations.

The purpose of mechanical calculations for collectors is to determine the maximum stresses in structural elements at all possible temperature conditions, which allows identifying the weakest elements of the designed collector and creating a reliable structure. Issues of calculation of temperature mechanical stresses arising in the elements of the collector design of electric machines under steady-state modes, have been most fully reflected in [5, 6].

The elements of the collector structure can be acted upon at the same time by three types of forces: forces caused by tightening the collector with bolts or other fasteners that occur during the production of the collector; temperature mechanical forces caused by the change in the collector temperature field arising during production, during testing, during operation; centrifugal forces that occur when the collector rotates. Temperature mechanical forces arising due to the temperature difference between the collector and temperature coefficient of linear expansion of copper collector plates ( $\alpha_{Cu}$ ) and steel construction fasteners ( $\alpha_{Fe}$ ). The difference in copper and steel temperatures of the collector depends on the design, mode parameters, ventilation conditions and is determined by the thermal calculation of the collector. The copper coefficient is 1.54 times higher than the steel of the collector. As the steel mounting elements of the collector limit the axial deformations of the collector plate set, the temperature mechanical stresses are determined by the difference of the thermal deformations of the copper and steel in the axial direction and the elasticity of the collector elements. Thermal deformations of structural elements occur both due to the direct elongation of a set of copper plates and clamping bolts, and by increasing the diameter of the "swallow tail" of the circular arch of the collector and the pressure cones of the case components.

When the collector structure is heated in the process of static or dynamic collector formation, the axial size of the circular arch increases between the middle of the supporting surfaces of the "swallow tail" of the arch and the expansion cones and clamping bolts are expanded. Thus, there is an increase in the length of the elements of the collector, which depends on the excess temperature and can be determined as follows:

$$\Delta \ell_{Cu} = (\Theta_{fin} - \Theta_{init})_{Cu} \cdot \alpha_{Cu} \cdot (\ell_{Cu} + 2R_N / tg(\alpha_k)). \quad (10)$$

$$\Delta \ell_{Fe} = (\Theta_{fin} - \Theta_{init})_{Fe} \cdot \alpha_{Fe} \cdot (\ell_{Fe} + 2R_N / tg(\alpha_k)). \quad (11)$$

As the freedom of thermal deformation of the collector circular arch is limited by the fasteners, an additional axial force  $T_\Theta$  occurs when the collector is heated, which stretches the reinforcing elements and compresses the circular collector arch through the cuffs.

This effort is determined by the condition of the deformation of the arch and the fasteners of the heated collector, taking into account the pliability of its connections. The additional axial force resulting from the change in excess of the temperature of the copper circular arch at  $(\Theta_{fin} - \Theta_{init})_{Cu}$ , and the mounting elements of the collector at  $(\Theta_{fin} - \Theta_{init})_{Fe}$ , will be determined from (11):

$$T_\Theta = \Delta \ell_{Cu} - \Delta \ell_{Fe} / (\lambda_p + \lambda_k + \lambda_\delta + \lambda_m). \quad (12)$$

Then the increase of initial forces and mechanical stresses in the elements of the collector structure, caused by the occurrence of additional axial force when changing the temperature state of the structure, is estimated by the following temperature coefficient:

$$K_\Theta = T_{fin} / T_{init} = 1 + T_\Theta / T_{init}. \quad (13)$$

The resulting mechanical stresses in the elements of the fixed collector at the new temperature state of the structure will be equal to the sum of the initial and temperature mechanical stresses, which are easily distinguished by subtracting the primary stresses from the resulting stresses. The increase in the primary forces and mechanical stresses in the elements of the structure under the influence of centrifugal forces during the rotation of the collector is estimated by the speed coefficient

$$K_c = 1 + C_{ax} \cdot \lambda_p / (T \cdot \sum \lambda), \quad (14)$$

where  $C_{ax}$  — axial component of centrifugal force circular collector arch, N;  $T$  — collector tightening axial force, N;  $\sum \lambda$  — total compliance structural elements of the collector, m/N.

The simultaneous influence of centrifugal and temperature mechanical forces on the value of primary mechanical stresses in the elements of the collector structure is estimated by multiplying the coefficients  $K_\Theta \cdot K_c$ .

**Methods of calculations.** Based on this, it can be presented the following sequence of calculation in non-constant modes:

1. According to the method [4] determined the initial stresses in the elements of the design of real collector (elements at the same temperature +20 °C), due to tightening manifold bolts compliance elements. For temperature-time dependences of structural elements of the collector thermal calculation is made one of the proposed methods for a given mode settings. The entire time period of the non-constant thermal process will be divided by the finite number of intervals and the excess temperature of the collector elements at the beginning ( $\Theta_{init}$ ) and end ( $\Theta_{fin}$ ) of each of the time intervals is fixed, the final excess of the element temperature for the previous period of time is the initial one for the next one. Changes are made to the excess temperature of copper circular arch ( $\Theta_{fin} - \Theta_{init}$ )<sub>Cu</sub> and steel fasteners ( $\Theta_{fin} - \Theta_{init}$ )<sub>Fe</sub> for the first time in expressions (10) and (11), there is a difference of thermal deformations of these elements ( $\Delta \ell_{Cu} - \Delta \ell_{Fe}$ ), the expressions (12) and (13) are the temperature force ( $T_\Theta$ ) and the temperature coefficient ( $K_\Theta$ ) for the first time interval.

2. Multiplication of the primary mechanical stresses in the elements of the fixed collector by the temperature coefficient gives the resulting mechanical stresses in these elements until the end of the first period of time at the new temperature state. The mechanical stresses in the structural elements until the end of the next period of time at the new temperature state are in the same way as for the previous one. The process of calculating mechanical stresses is repeated until the thermal process is established.

3. Taking into account the influence of centrifugal forces during the rotation of the collector on the magnitude of mechanical stresses in the elements of the fixed collector is carried out by multiplying the resulting mechanical stresses for any period of time of a non-constant thermal process by the velocity coefficient ( $K_c$ ). As a result of the calculation, the dependence is obtained, which characterizes the change of temperature mechanical stresses in the elements of the collector structure during a non-constant thermal process.

The study of temperature distribution and temperature mechanical stresses in the TM collector of the locomotive DE-1 was carried out to one of the most difficult non-permanent modes — the dynamic formation of the collector at a temperature of +160 °C and high rotation speed. The initial mechanical stresses in the elements of the fixed collector at a temperature of +20 °C are: in the cuff about 46.1 MPa; in the "swallow tail" of the collector plate, the voltage was 143.2 MPa; in the tightening bolt — 332.9 MPa; specific pressure between the collector plates — 44.65 MPa; axial tightening force of the collector  $10.8 \cdot 10^5$  N; the total pliability of the structure  $\sum \lambda = 0.5 \cdot 10^{-8}$  m/N. The thermal deformations are expressed by:

$$\Delta \ell_{Cu} = 1056 \cdot \Delta \Theta \cdot 10^{-8}, \quad (15)$$

$$\Delta \ell_{Fe} = 1000 \cdot \Delta \Theta \cdot 10^{-8}. \quad (16)$$

Dynamic molding refers to the operations of the technological process of collector production. In the dynamic formation of increasing the temperature of the copper circular arch and steel body is



due to heat transfer from hot air to the outer surfaces of these structural elements. The total heat capacity of the steel body and the heating time is almost 2 times higher than that of copper, which results in a difference in the rates of temperature rise of these elements: at the initial section of the heating curve, the rate of increase of the copper temperature of the circular collector arch is 1.5 times higher than the speed increase of temperature of steel of the case; the copper temperature is set faster and the steel temperature continues to rise. Due to the different rate of rise in temperature and the time of setting the copper and steel collector temperature mechanical stresses during dynamic molding pass through a pronounced maximum, decreasing by the time of installation of the thermal process. The influence of centrifugal forces during the maximum of mechanical stresses leads to an increase of primary stresses of 1.76 times, which causes an excess of permissible stresses for cuffed miconite by 3% [1—4]. The following is an example of the calculation of the change in temperature and temperature-mechanical stresses in the elements of the collector locomotive DE1 during dynamic molding. According to [4] power loss on the working surface of the collector  $P_{tr} + P_e = 4040$  W. The effect of the armature winding is taken into account by increasing the power loss on the collector 1.3 times, the power loss on the surface of one plate  $P_1 = 4040 \cdot 1,3 / 348 = 15,1$  W. Heat capacity of the plate

$$C_1 = c_1 \cdot c_1 \cdot V_1 = 390 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 27,65 \cdot 10^{-6} = 96 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C}.$$

The heat capacity of the part of the body insulation included in the calculation sector is  $Cr_2 = C_2 \cdot c_2 \cdot V_2 = 920 \cdot 2,4 \cdot 10^3 \cdot 3,525 \cdot 10^{-6} = 7,8 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C}$ . Heat capacity of the case included in the settlement sector

$$Cr_3 = C_3 \cdot c_3 \cdot V_3 = 480 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 50,82 \cdot 10^{-6} = 190,3 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C}.$$

Heat transfer coefficients  $\alpha_1 = 234 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_3 = 127 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . The equivalent thickness of the case insulation  $\delta_{2e} = 0,28 \cdot 10^{-2} \text{ m}$ . The calculation of the temperature-time dependencies of the collector elements is carried out in accordance with expressions (10) and (11). The heat capacity of the case insulation is added to the case  $C_2 = Cr_2 + Cr_3 = 198,1 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C}$ . The values of the coefficients in the expressions for  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$ :

$$K_{11} = \alpha_1 \cdot F_1 / C_1 + \lambda_2 \cdot F_2 / \delta_{2e} \cdot C_1 = 0,00343 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C},$$

$$K_{12} = \lambda_2 \cdot F_2 / \delta_{2e} \cdot C_1 = 0,0002 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C},$$

$$K_p = P_1 / C_1 = 0,1573, \quad K_{21} = \lambda_2 \cdot F_2 / \delta_{2e} \cdot C_2 = 0,0000973,$$

$$K_{22} = \alpha_3 \cdot F_3 / C_2 + \lambda_2 \cdot F_2 / \delta_{2e} \cdot C_2 = 0,0009775 \text{ W} \cdot \text{s}/^\circ\text{C};$$

$$K_1 = -0,00095, \quad K_2 = -0,0035, \quad \Theta_{u1} = 46,8^\circ\text{C}, \quad \Theta_{init} = -40^\circ\text{C};$$

$$K_3 = -0,00095, \quad K_4 = -0,0035, \quad \Theta_{u1} = 4,66^\circ\text{C}.$$

In Fig. 3 shows the temperature-time dependencies of the collector elements for the specified mode. The analysis of these dependencies shows the following: at the initial section of the heating curves (up to 9 minutes from the start of the mode), the rate of increase of the copper arch circulating temperature is 5 times higher than the steel fasteners of the housing, then the rate of increase of the copper temperature drops to almost zero, and the steel of the fixing items stored; constant heating time of copper is about 9 minutes, steel fasteners — about 28 minutes. These dependencies are then used to calculate the collector temperature and mechanical stresses.

Fig. 4 shows the change of temperature-mechanical stresses of the collector elements. Analyzing the curves of changes in temperature mechanical stresses, it can be noted the following: temperature mechanical stresses in the elements of the collector pass through a pronounced maximum, decreasing in magnitude until the time of the steady-state mode, which is caused by the difference in the rate of change of excess temperatures of copper circular arches and steel mounting elements; the maximum of temperature mechanical stresses comes (10—20) minutes after the start of the mode and is 10.3% of the value of the initial mechanical stresses in the fixed collector. The influence of the centrifugal forces of the corresponding accelerating speed during the maximum of temperature-mechanical stresses leads to an increase of initial stresses of 1.82 times, which causes an excess of permissible stresses for the cuffed miconite by 6%.

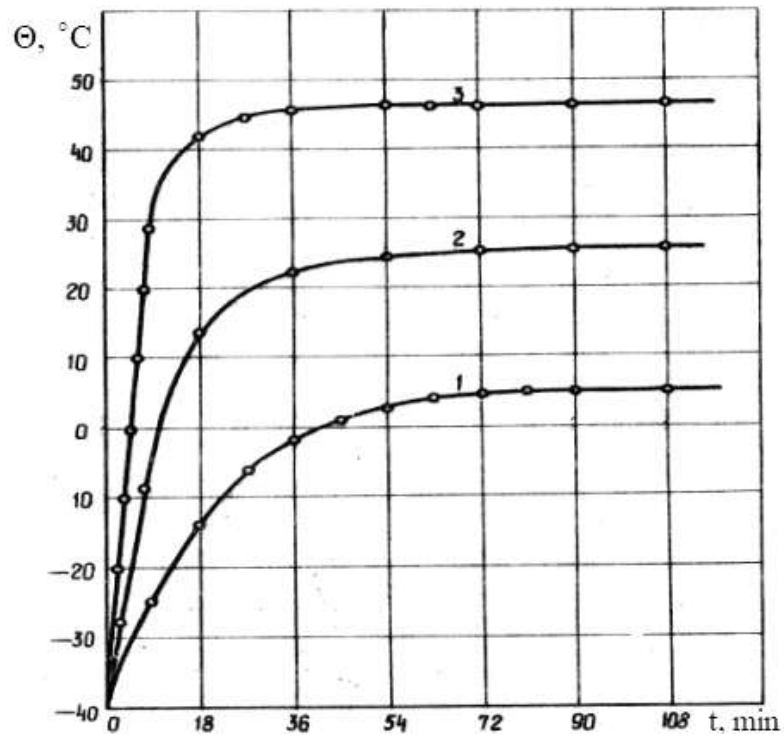


Fig. 3. Temperature-time dependence of the collector locomotive DE-1 elements in start-up mode with rated load

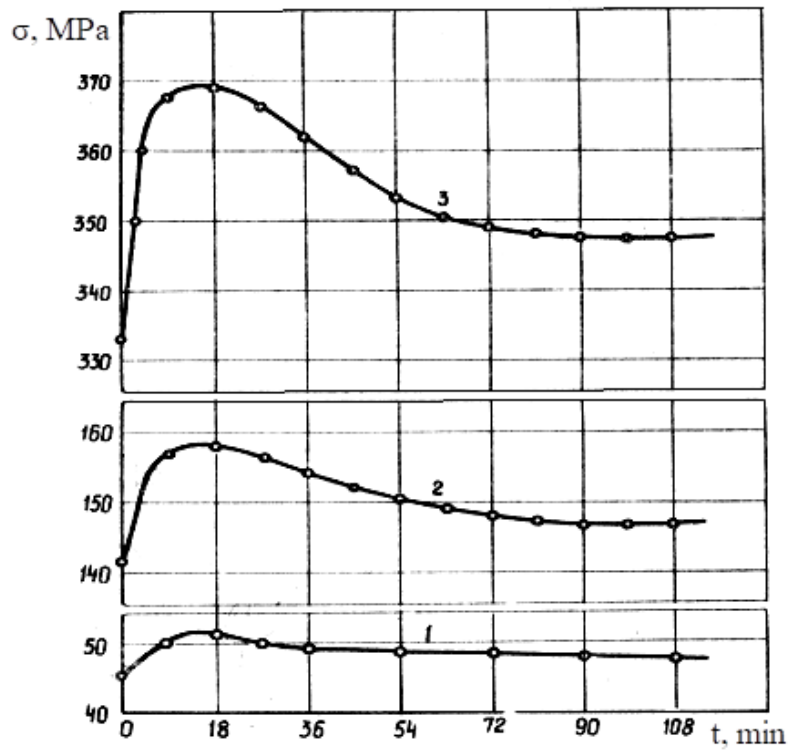


Fig. 4. Change of the electric locomotive collector DE-1 temperature voltages in start-up mode with rated load

The temperature-time dependencies and changes in the temperature mechanical stresses of the collector elements for other modes are similar. Fig. 3 shows the temperature dependence of the following elements: case — 1, insulation — 2; plate — 3. Fig. 4 shows the dependence of temperature stresses on time for the following elements: cuff — 1; "swallow tail" plate — 2, clamping bolt — 3.

Thus, it is found that due to the different speeds of temperature rise and time of reaching constant temperatures of copper circular arch and steel fasteners of the structure, the temperature mechanical stresses in the elements of the TM collectors during unsteady mode pass through a pronounced maximum. The decrease in the magnitude of the temperature-mechanical stresses is caused by the prolonged thermal expansion of the structural steel elements, while the thermal expansion of the copper circular arch is almost stopped.

**Algorithm for identification of temperature-mechanical stresses.** Based on the above material, the following algorithm for identification of temperature-mechanical stresses may be proposed:

1. The time of transition is divided by the finite number of intervals at which copper and steel temperatures are fixed at the beginning and end of these intervals.

2. Calculation of non-constant temperature-mechanical efforts at successive time intervals of technological or operational processes requires the available data on the discrete temperature field of the collector parts, for which the method of numerical solving of differential equations of thermal conductivity by means of thermal circuits is used.

3. The difference of thermal deformations of copper and steel of the collector in the first time interval, the temperature effort and the coefficient of increase of the initial mechanical stresses from the temperature influence  $K_{\ominus}$  is determined.

4. The multiplication of mechanical stresses at the beginning of technological or operational modes on  $K_{\ominus}$  will give the amount of stress in the collector elements at the end of the first time period, which is the initial for the next period of time.

5. The identification process is repeated throughout the time interval.

### Conclusions

The results of a theoretical study of the distribution of temperature-mechanical forces in TM collectors were conducted for the most dangerous difficult transient modes, which include: dynamic formation of the collector at a temperature of +160 °C at high speed; testing of TM made at high speed; start-up of TM under load in rated mode or at maximum load, limited collector insulation resistance class.

Chromel-Copel thermocouples were used to measure excess temperatures, mechanical forces in the elements of the collector were measured by means of strain gauges, to determine the regularities of the process of heat transfer from the collector surface to the cooling air, the method of steady heat flow and microclimate were applied. As a result of researches it is established that the maximum value of temperature-mechanical stresses can reach up to 35% from the value of initial mechanical stresses. The influence of centrifugal forces corresponding to the acceleration frequency of the collector during the maximum temperature-mechanical effort can lead to an increase in the initial mechanical stresses in the structural elements by 1.7—2.6 times.

Most of the research results obtained for the manufacturing process of collectors main electric traction motors, but they can also be used to the technology of electric DC machines of other types.

### References

- [1] Meerzon Yu.M (2004). Analiz tehničeskogo sostoyaniya tyagovyh dvigatelej [Analysis of the technical condition of traction engines] / Povyshenie resursa tyagovyh elektrodvigatelej - Increasing the resource of traction motors: Proceedings of the scientific and technical conference of the Research Institute of Railway Transport. (Vols 1), (pp.10–12). Moscow [in Russian]
- [2] Klimchenkova N.V. (2001) Sovershenstvovanie tehnologii izgotovleniya kollektorov elektricheskikh mashin na osnove analiza neustanovivshihsiya parametrov [Improving the manufacturing

- technology of collectors of electrical machines based on an analysis of transient parameters]. Extended abstract of candidate's thesis. Donetsk:DonNTU [in Russian].
- [3] V.T.Klimchenkov & N.V.Klimchenkova (1995). Sposib dinamichnogo formuvannya kolektora [The method of dynamic formation of the collector] . Of. byul. «Promislova vlasnist» – Official Gazette "Industrial Property", 4, 21–26 [in Ukrainian]
  - [4] N.V.Klimchenkova & V.T.Klimchenkov (1996).. Opredelenie parametrov temperaturnogo rezhima pri dinamicheskoy formovke kolektora s uchetom konstruktivnyh osobennostej [Determination of temperature parameters during dynamic formation of the collector, taking into account design features], Sb.nauch. statej. Donbasskoj gosud. mashinostr. akademii. – Proceedings of scientific articles of the Donbass State Engineering Academy (Vols.3), (s.496–499). Kramatorsk: DGMA [in Russian].
  - [5] Surovnikov A.A., & Klimchenkov V.T. (1982). Vliyanie relefa rabochej poverhnosti na raspredelenie nestacionarnyh temperatur i temperaturnyh napryazhenij v kollektore [The influence of the relief of the working surface on the distribution of unsteady temperatures and temperature stresses in the collector]. Elektromekhanika – Electromechanics, 12, 1468–1470 [in Russian]
  - [6] Klimchenkova N.V (1996). Razrabotka modeli rascheta mehanicheskikh nagruzok pri formovke kollektornogo kolca [Development of a model for calculating mechanical loads during molding of a collector elements]. Novye ekonomicheskie otnosheniya i kadrovoe obespechenie proizvodstva – New economic relations and staffing of production: proceedings of an interuniversity scientific conference (pp. 52–59). Kramatorsk: DGMA [in Russian]

## **РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ НЕСТАЛИХ ТЕМПЕРАТУРНО-МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ У КОЛЕКТОРІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

**Шеремет О.І., Клімченкова Н.В., Садовой О.В., Сохіна Ю.В.**

### **Реферат**

Близько 50% всіх відмов тягових електродвигунів магістральних електровозів припадає на колектор, на якій впливають значні несталі температурно-механічні зусилля як у технологічних, так і в експлуатаційних режимах. В зв'язку з цим розробка методик розрахунку та ідентифікації несталих температурних полів і температурно-механічних напружень в елементах колекторів сучасних тягових електродвигунів набула в теперішній час особливої актуальності.

Мета роботи полягає в розробці методики розрахунку та ідентифікації температурних полів і температурно-механічних напружень у колекторах тягових електродвигунів при несталих режимах.

Відповідно до мети в роботі поставлені і вирішені наступні задачі: запропоновано послідовність розрахунку температурних механічних напружень та температур при несталих режимах; проведено теоретичні дослідження розподілу і зміни температур і температурно-механічних напружень в елементах колекторів тягових електродвигунів у несталих режимах; розроблено систему ідентифікації температурно-механічних напружень та надано рекомендації по їх зменшенню.

Результати теоретичного дослідження розподілу температурно-механічних зусиль у колекторах тягових електродвигунів проведені для найбільш небезпечних важких перехідних режимів, до яких відносять: динамічне формування колектору при температурі +160°C на підвищеній частоті обертання; випробування виготовленого тягового електродвигуна при підвищеній частоті обертання; пуск тягового електродвигуна під навантаженням у номінальному режимі або при максимальному навантаженні, обмеженому класі нагрівостійкості ізоляції колектору. Для вимірювання перевищень температур використовувались хромель-копелеві термомпари, механічні зусилля у елементах колектору вимірювались за допомогою тензорезисторів, для уточнення закономірностей процесу тепловіддачі з поверхні колектору до охолоджуючого

повітря застосовано спосіб усталеного теплового потоку та мікрокліматичні датчики. У результаті досліджень встановлено, що максимальна величина температурно-механічних напружень може досягати до 35% від величини початкових механічних напружень. Вплив відцентрованих сил, які відповідають розгінній частоті обертання колектору під час максимуму температурно-механічних зусиль може призвести до збільшення початкових механічних напружень в елементах конструкції у 1,7–2,6 рази

Більшість результатів досліджень отримано для процесу виготовлення колекторів тягових електродвигунів магістральних електровозів, але вони можуть бути також використані до технології виготовлення електричних машин постійного струму інших типів.

### Література

1. Меерзон Ю.М. Анализ технического состояния тяговых двигателей. *Повышение ресурса тяговых электродвигателей*: сб. трудов научно-техн. конференции всерос. научно-исслед. железнодорожного транспорта. Москва, 2004. С. 10–12.
2. Климченкова Н.В. Совершенствование технологии изготовления коллекторов электрических машин на основе анализа неустановившихся параметров: автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук: 05.09.01/ Донецкий нац. техн. университет. Донецк, 2001. 20 с.
3. Спосіб динамічного формування колектора: пат.71182 Україна: МПК7 H02K 15/00, H01R 43/06 №20031110614; заявл. 01.12.93, опубл. 26.12.95, Бюл. №4. 21 с.
4. Климченкова Н.В., Климченков В.Т. Определение параметров температурного режима при динамической формовке коллектора с учетом конструктивных особенностей. *Сборник научных статей Донбасской государственной машиностроительной академии*. Краматорск, 1996. №3. С. 496–499.
5. Суруков А.А., Климченков В.Т. Влияние рельефа рабочей поверхности на распределение нестационарных температур и температурных напряжений в коллекторе. *Электромеханика*. 1982. № 12. С. 1468–1470.
6. Климченкова Н.В. Разработка модели расчета механических нагрузок при формовке коллекторного кольца. *Новые экономические отношения и кадровое обеспечение производства* Труды межвуз. науч.-техн. конф. Краматорск: ДГМА, 1996. С. 52–59.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185088

UDC 669.136.9

**O.G. Cherneta**<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor.

**V.I. Kubich**<sup>2</sup>, Ph.D., Assistant Professor.

**M.A. Shcherbina**<sup>1</sup>, PhD, Associate Professor.

**V.S. Averyanov**<sup>1</sup>, Ph.D., Associate Professor.

**D.Z. Shmatko**<sup>1</sup>, Ph.D., Associate Professor.

<sup>1</sup>Dniprovsky State Technical University, Kamianske

<sup>2</sup>National University "Zaporizhzhaska polytechnika", Zaporizhzhya

## RESEARCH OF STEEL 45 STRUGGLING INFLUENCE ON THE PARAMETERS OF ADHESION COMMUNICATION WITH CHROME, CHROME-NICKEL STEEL

*The results of the microstructure transformation research service steel 45 (fragments of the cam camshaft cam) of the surface layers, which are subjected to modification by boring, are presented in the paper. The graphical dependences of the tangential strength and the coefficient of molecular bond hardening on the contact pressure were obtained for tribological systems of materials "12X2H4 - steel 45", "45XH2MFA - steel 45", "40X - steel 45" in the modeling of shear resistance-friction machine 2 were received. The ambiguous effect of boring on the manifestation of the adhesion bond parameters of the surfaces of the materials under consideration was revealed.*

**Keywords:** microstructure; tangential strength; coefficient of hardening; adhesive bond; surface; shear.

*В роботі наведені результати дослідження трансформації мікроструктури поверхневих шарів експлуатаційної сталі 45 (фрагменти кулачка розподільного валу двигуна), які були оброблені методом борування для модифікування поверхневої структури. Отримані графічні залежності тангенціальної міцності і коефіцієнта зміцнення молекулярного зв'язку від тиску в контакті для трибологічних систем матеріалів «12Х2Н4 - сталь 45», «45ХН2МФА - сталь 45», «40Х - сталь 45» при моделюванні зсувного опору на машині тертя СМЦ-2. Виявлено неоднозначний вплив борування на прояв параметрів адгезійного зв'язку поверхней визначених матеріалів.*

**Ключеві слова:** мікроструктура; тангенціальна міцність; коефіцієнт зміцнення; адгезійний зв'язок; поверхня; зсув.

### Formulation of the problem

The successful choice of the technique and methods of surface layer processing the machine parts depends to a great extent on the efficiency of the end result — the wear resistance and durability of unit operation, an assembly and a car as a whole. There are many methods of hardening the steel parts surface [1—5]:

The contact interaction of the working surfaces of metals during the transfer and transformation of movements is carried out with friction losses, which are determined by the molecular and mechanical component, determining the parameters of the latter is an urgent scientific and applied task. This is especially concerned surfaces that are modified by alloying elements whose percentage content affects the thermodynamic potential of surface and surface layers. Thus, the expediency of using boron to improve the mechanical properties of medium carbon structural steels has been identified in a number of previous studies.

### Formulation of the study purpose

The purpose of this work is to determine the effect of surface boring of steel 45 on changing the adhesive bond parameters  $\tau_0$  and  $\beta$  with chromium, chromium-nickel steels with variant hardness of surface layers in shear resistance modeling, where in the first stage it is proposed to perform comparative studies without lubricants. However, information regarding the display of the parameters of the friction molecular component is the shear strength of the adhesive bond  $\tau_0$  and the piezoelectric coefficient  $\beta$  of the molecular component for tribological systems, such as "steel 45 + B% - 40X",

"steel 45 + B% - 12X2H4", "steel 45 + B% - 45XH2MΦA », is currently undefined. These parameters characterize the adhesive properties of the materials. Moreover, since the application of surface technology of boron impregnation turns out the mechanical properties of steel 45 [6—8], the display of the molecular component parameters both in terms of lubrication and without it, when contacted with the surface layers of other metals with variant hardness will have different value. This is necessary, first of all, for the predictive estimation of tribomechanical properties of tribal connections when applying mathematical expressions, which establish the relationship between the friction coefficient and the parameters of the contact microgeometry, the adhesive component, the hardness, the load at the development of plastic, elastic, plastic-elastic deformation areas of friction interaction.

### Main material presenting

Traditionally, the restoration of a worn surface geometry is restored by facing the layer of metal on a pre-prepared surface. The main factor for surface restoration is the strength of the faced surface of the deposited layer with the base material. Therefore, it is very important to fit the surfacing material in such a way as to ensure a secure adhesion of the base material to the substrate, to avoid chips and concentrations of thermal stresses in the transition zones, to have high physical and mechanical characteristics, to be able to strengthen the processing. Figure 1 presents a graphical model of the dependence of the part surface layer hardness from steel 45, depending on the technological hardening processing methods, on which the dynamics and transformation of the microstructure can clearly observe It depends on the physical and mechanical properties of the workpiece working surface from steel 45. To restore the cam working surface made of steel 45 OZSH-3 electrodes with the following chemical composition (C — 0.4%; Mn — 0.5%; Si — 1.9%; Cr — 9.9%; S — 0.013%; P — 0.021%) [8—11] are used. Fig. 1 shows photos of the microstructures of the corresponding zones of the cam sector.

Fig. 1. Photographs of the cam sector microstructures (a. (820), b. (819), b. (818) mid, b (813), b. (819) intersection, sublayer and extreme zone.

Thus, in the transition zone, the residual austenite is transformed into ferrite with the formation of two phases: ferrite particles (dark cascades) and the boron + carbon phase — boron carbide (white inclusions) Fig. 1 c. (818) — fragment of the surface layer zone with increasing  $\times 1000$  (819), b (817), and (820) the general structure of the surface layer  $\times 1000$  times.

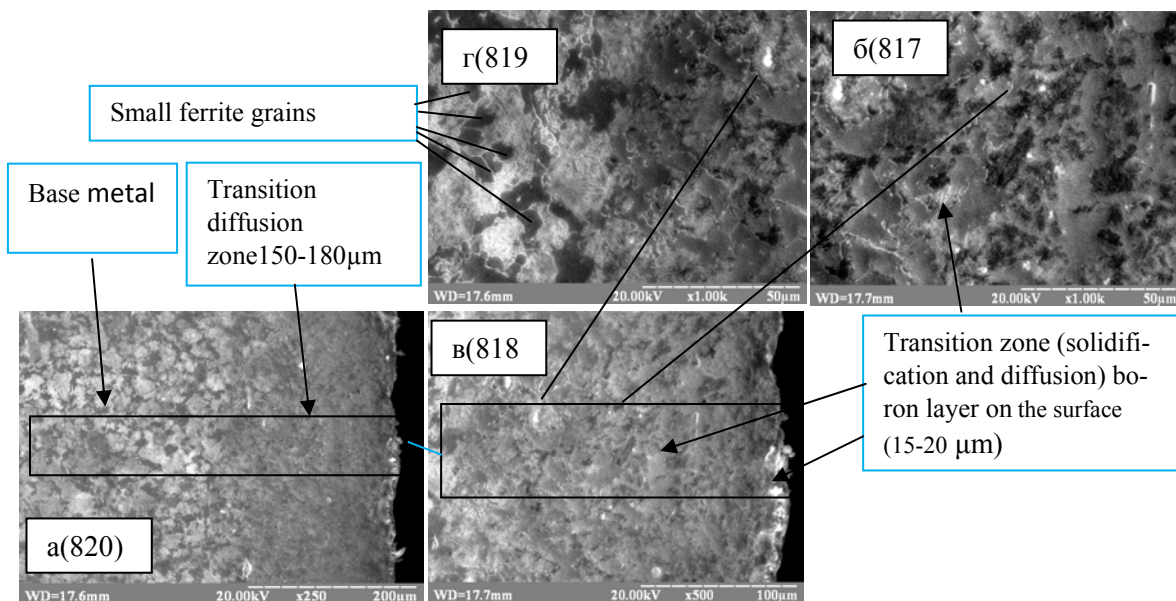


Fig. 1. Photos of the microstructure of the part surface layer of the cam sector from steel 45



### Research methodology

It is suggested to use samples of the following metals for research:

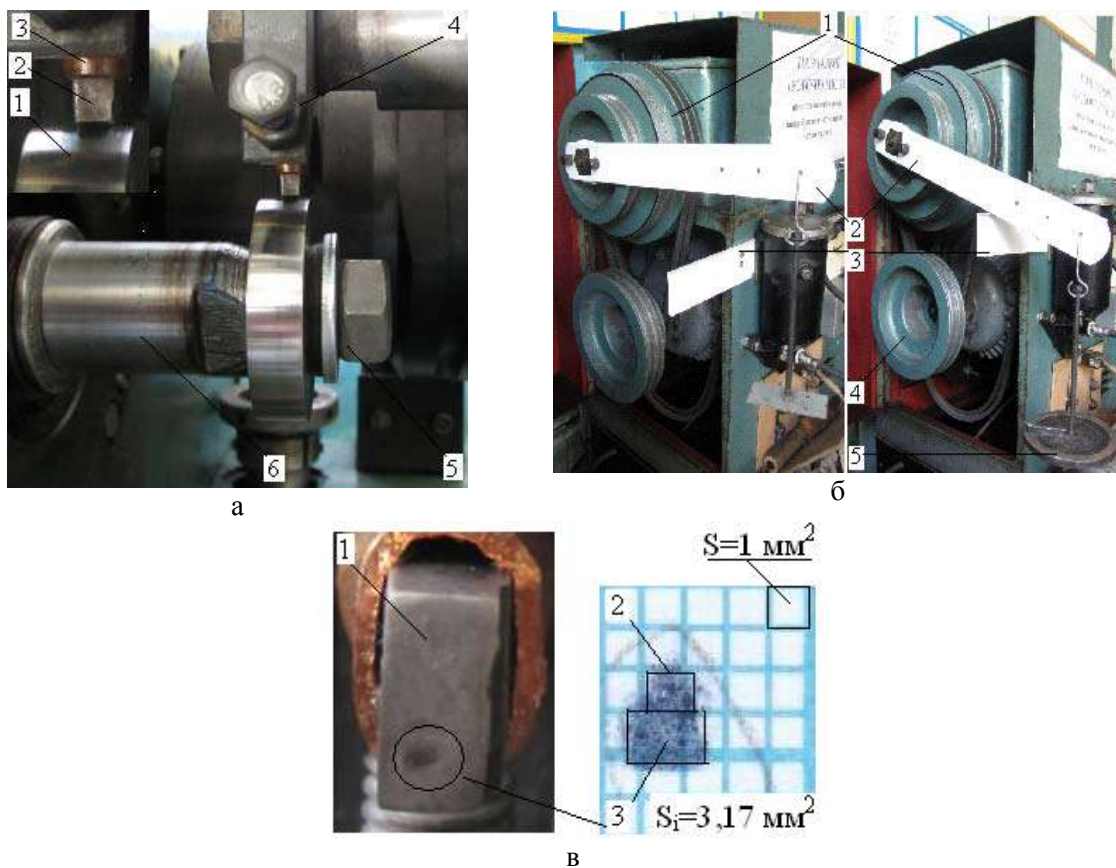
- steel 45 without treatment, NRC45;
- steel 45, surface modified with boron: — steel 45 + Vi%, NRC65.

In this case, to determine the parameters of friction interaction, a machine to test materials for friction and wear model SMC-2 using samples is proposed:

– for steel 45 in the form of triangles with a cylindrical outer surface, 4 mm thick, which is fixed in the mandrel and static;

– for other metals in the form of a disk with a diameter of 50 mm and a thickness of 12 mm, which is fixed to the lower shaft of the machine and rotates.

The parameters of the molecular component are proposed to be determined in accordance with the method of work on the adhesionometer OT-1 [12, 13], and on the device with the use of a spherical indenter [7], which provide for measurements of the friction torque  $M_t$  when the friction coupling of spherical surfaces with planes is broken the surfaces of the samples (plates) and the radius (diameter) of the imprint projection  $R_0$  (d). However, the simulation of the friction coupling will be carried out when the disk is displaced from the disc position relative to the triangle-shaped pads at appropriate loads (Fig. 2a) with the use of the SMC-2 friction machine with the corresponding redesign of the lower shaft drive. With:



*Fig. 2. Methodological support for measurement of displacement resistance during displacement: a — contact of model samples: 1 — disk; 2 — a shoe; 3 — additional holder of the pad; 4 — screws securing the additional samples; 5 — details of mounting the disk; 6 — the lower shaft of the friction machine SMC-2; b — angular loading drive of the lower shaft: 1 — the upper pulley; 2 — the cargo lever; 3 — limiter of movement of the lever of cargoes; 4 — the lower pulley; 5 — cargo; c — fingerprints, N = 280H: 1 — booth with boron carbide; 2,3 — perimeters of the calculated planes*



– the maximum moment of displacement will be determined by the recorder on the field of the scale tape at a fixed rotation on the angle  $\alpha$  under the specified load of the lower shaft (Fig. 2 b). The weight of the load will determine the shear rate;

– the area of interaction of the friction surfaces will be determined by the imprint on graph paper (Fig. 3).

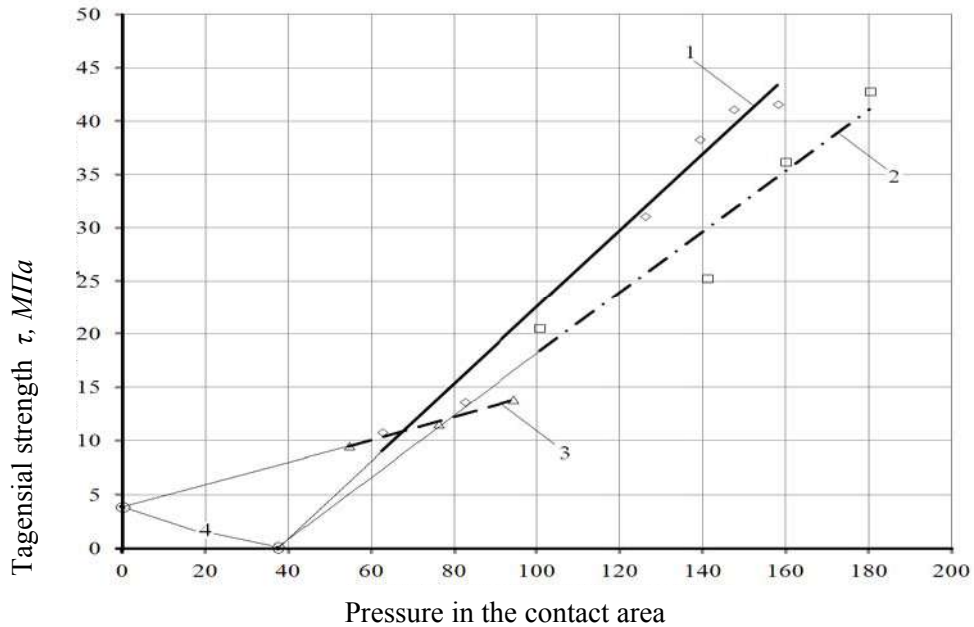


Fig. 3. Dependence of the tangential strength of adhesive bonding of non-drilled steel 45 on the pressure at a shear rate of  $10.16 \pm 0.8$  mm / s: 1 — 12X2H4; 2 — 40X; 3 — 45HN2MFA; 4 — backward extrapolation points

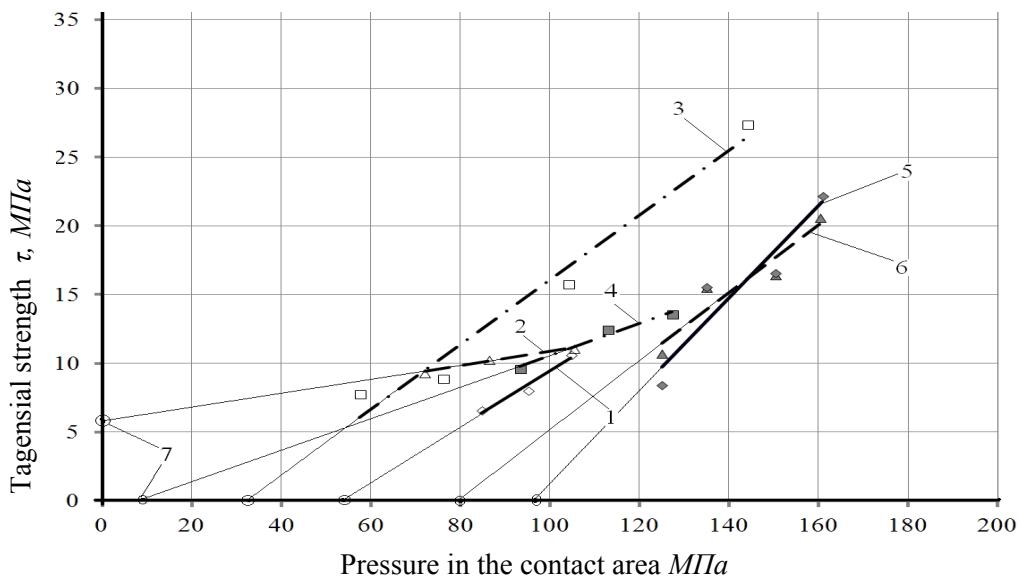


Fig. 4. Dependence of the tangential strength of the adhesive bond of the bored steel 45 on the pressure at a shear rate of  $10.16 \pm 0.8$  mm / s: 1,2,3 — (boron): 12X2H4; 45XN2MFA; 40X; 4,5,6 — (boron carbide): 40X; 12X2H4; 45XN2MFA; 7 — points of inverse extrapolation

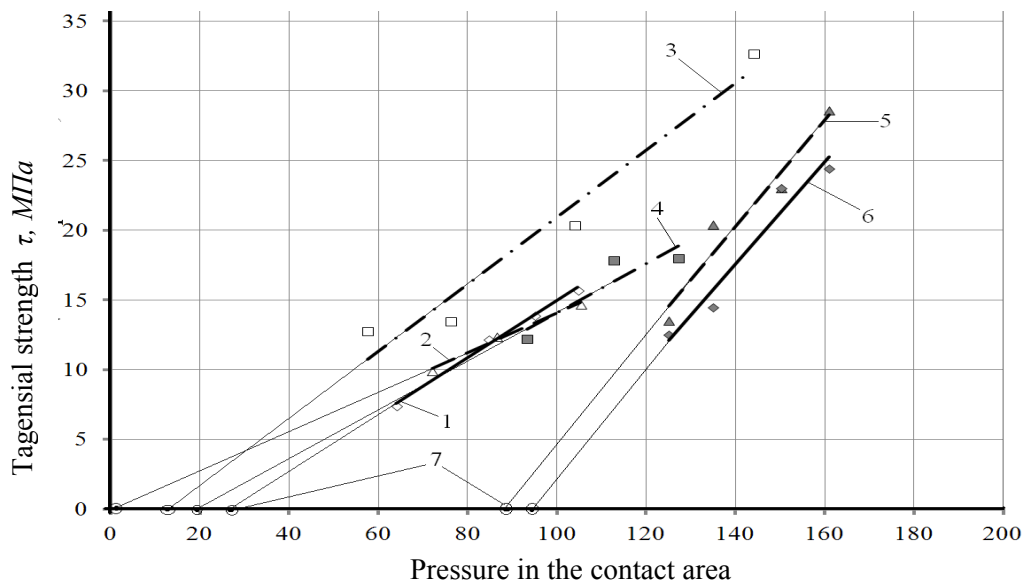


Fig. 5. Dependence of the tangential strength of the adhesive bond of the stainless steel 45 on the pressure at a shear rate of  $5.08 \pm 0.6$  mm / s: 1,2,3 — (boron): 12X2H4; 45XN2MFA; 40X; 4,5,6 — (boron carbide): 40X; 12X2H4; 45XN2MFA; 7 — points of inverse extrapolation

#### The review of the results indicates the following

Boring has a significant effect on changing the parameters of the adhesive bond. The parameter  $\tau_0$  had only the tribological system of materials "45XH2MΦA - steel 45", with the exception of the mode of interaction at a shear rate of  $5.08 \pm 0.6$  mm/s.

For other tribological systems of materials, the parameter of occurred only with increasing pressure in the contacts to the corresponding values, which also differ from both the modification characteristics and the hardness of the contacting surfaces. Thus, for tribological systems of materials "12X2H4 - steel 45" and "45XH2MΦA - steel 45" boring shifts the pressure values at which the adhesive bond ( $\tau > 0$ ) begins to show toward larger values (Tabl. 1), while in the tribological system "40X - steel 45" on the contrary — towards smaller values except the shear rate of  $5.08 \pm 0.6$  mm/s. The above mentioned indicates that there are modes of contact interaction in which during the calculating it is not advisable. to take into account its molecular component, for example, the coefficient of friction.

The proposed scheme of friction "disk — shoe" firstly is due to the appropriateness of boring the subject structural elements, in this case, they are the segments of the camshafts of the internal combustion engine, and secondly by the simplification of the reproduction of displacement when using the typical test equipment.

The measurements in the following sequence were performed. The disks of the corresponding materials were fixed to the lower shaft of the friction machine. The shoes were placed in an additional holder, fixed with screws in a regular holder, which is fixed to the upper shaft of the friction machine. Further, the pad was pressed against the disk with the appropriate force by a friction machine load screw. The loads were mattered as 140N, 185H, 230H; 280H. In the following, the disk was displaced by the loads 5 (Fig. 2b) and rotated to a fixed angle  $\alpha$ . Time spent on angular displacement determined the shear rate —  $t_1 = 0.43$  s  $t_2 = 1$  s. The average linear displacement of the disk was  $l = 4.5$  mm. At the same time, the recorder on the tribogram recorded the temporary resistance to shift by deviation from zero. The friction moment was determined by the mean statistical with the corresponding dispersions by the number of experiments ( $n = 8$ ) at two shear rates:  $v_1 = 10.16 \pm 0.8$  mm / s,  $v_2 = 5.08 \pm 0.6$  mm / s. The average statistical variance  $\tau$  was  $D_{\min} = 0.5$  MPa,  $D_{\max} = 1.13$  MPa.

The adhesive bond shear strength (molecular bond shear resistance) — the tangential strength  $\tau$  was determined in accordance with the expression:

$$\tau = \frac{M_m}{r \cdot S_b}, \quad (1)$$

where  $M_m$  is the moment of shear friction, N·m;  $r$  is the radius of the disk, m;  $S_b$  is the area of the imprint, mm<sup>2</sup>.

### Results of the studies and their discussion

A graphical approximation of the averaged data in the form of linear dependencies with inverse extrapolation of the shear resistance to displacement is shown in Fig. 3—5.

In this case, the parameters of the trend lines in Excel program determine their equations and the reliability of the approximation of  $R^2$ , the results are shown in tabl. 1.

Table 1. Parameters of approximation of experimental data for tribological system of materials "12X2H4 - steel 45"

Parameter	Steel 45 without boring	Steel 45 with boron	Steel 45 with boron carbide
Kind of equation	$\tau = 0,36p - 13,44$	$\tau = 0,19p - 10,44$	$\tau = 0,33p - 32,05$
		$\tau = 0,2p - 5,46$	$\tau = 0,37p - 33,73$
The accuracy of the approximation $R^2$	0,98	0,96	0,88
		0,99	0,95
Piezo coefficient $\beta$	0,36	0,19	0,33
		0,2	0,37
Tangential strength $\tau_0$ , МПа	>0 in $p \approx 37$ МПа	>0 in $p \approx 55$ МПа	>0 in $p \approx 97$ МПа
		>0 in $p \approx 27$ МПа	>0 in $p \approx 91$ МПа

Note. The upper line at shear rate  $v_1 = 10.16 \pm 0.8$  mm/s, the lower line at  $v_2 = 5.08 \pm 0.6$  mm/s.

There is no obvious general mechanism between the tendency of increasing the hardness of chromium, chromium-nickel steel and the coefficient of molecular bond  $\beta$  to the steel surface 45 when it is modified, since the increased hardness from 15HRC to 45 HRC:

– boring causes the storage of a minimum of  $\beta$  (0.36; 0.11; 0.28 without treatment) and (0.19; 0.05; 0.23);

– boron carbide causes a decrease in  $\beta$  (0.33 — without treatment; 0.24; 0.11).

Within one tribological system of materials, the maximal values of  $\beta$  are observed in the friction connection with the material of less rigidity — the system "12X2H4 - steel 45", and the modification of steel 45 leads to its decrease. This also occurs in the tribological system "40X - steel 45" where 40X steel has the maximal hardness. At the same time, at a hardness of 22HRC (intermediate value) for the system "45XH2MΦA - steel 45", the values of  $\beta$  are generally the lowest. It is also noted that boron boron and carbide in all cases reduces the value of  $\beta$  with the exception of the system "45HN2MFA - steel 45", in which it increases.

Also, there was an ambiguous effect of the shear rate on the manifestation of the adhesion parameters. Thus, for the tribological system "12X2H4 - steel 45" and "40X - steel 45", when the shear rate was reduced by almost 2 times, the value of  $\beta$  did not change significantly, however, as in the system "45XH2MΦA - steel 45" it increased in 2.8 times when saturated with boron, and boron carbide is in 1.58 times. In regard to pressures at which  $\tau > 0$ , they are essentially:

– decrease when boron saturated in 2.46 times for the system "40X - steel 45", 2 times for "12X2H4 - steel 45";

– increase when boron saturated with carbide in 1.9 times for "40X - steel 45".

### Conclusions

Introduced approaches to modeling the shear resistance under changes in normal loads and velocity of movement have been proposed, which made it possible to determine the nature of the effect of boring on the manifestation of the adhesion properties of the proposed materials. It is established that only 45XH2MΦA steel according to the conditions and modes of force, kinematic loading indi-

cates the presence of a parameter of tangential strength  $\tau_0$  from steel 45, in other experimental tribological systems of materials preliminary compressive efforts are required.

It is determined that in order to further reveal the mechanisms of adhesion bond formation, it is necessary to establish and take into account the topographies of the microhardness of the phase components of the contact interaction zones.

### References

- [1] Fransenyuk, I.V., & Fransenyuk, L.V. (2004). *Albom microstructur chuguniv, staley, tsetnih metaliv ta yih splavsiv [Product innovative police].* Moskva: Akademkniga [in Rosiya].
- [2] Malinov, L.S.(2012). *Diferentsialnie obrobki splaviv dlya povisheniya ih svoystv –perspektivnoye napravlenie [Novi materialy i tehnologiyi v metalurgii i mashinobuduvanni]* *Naukoviy chshurnal*, 2, 50–56.[in Ukrainian].
- [3] Devoyno, O.G. (2001). *Tehnologii formirovaniya iznosostoykikh pokritiy s pomochshyu lazernoy obrobki.* Minsk: UP Tehnologiya [in Belorusiya].
- [4] Cherneta, O.G., & Babko I.O., & Chaldishev Ye.V. (2014) *Doslidchshennya tehnologichnih sposobiv formuvannya znosostiykikh pokritiv na osnovi lazernoyi obrobki [Perspektivni tehnologii ta priladi]* *Zbirnik naukovih prats*, 5(2) 171–176.[in Ukrainian].
- [5] Cherneta, O.G., & Suhomlin, & Volochshyk, R.G., & Sereda, B.P. (2017) *Doslidchshennya mikrostrukturi znoshennykh detaley avtomobiliv iz staly 45 pri vidnovlenni i bagatokratniy termichniy obrobtsy [Perspektivni tehnologii ta priladi]* *Zbirnik naukovih prats*, 10(1) 212–216.[in Ukrainian].
- [6] Cherneta, O.G., & Suhomlin, V.I., & Korobochka, O.M. (2017) *Analiz transformatsii mikrostrukturi poverhnevogo sharu iz staly 45 v zalechshnosti vid tehnologichnih metodiv obrobki [Perspektivni tehnologii ta priladi]* *Zbirnik naukovih prats*, 11(2) 147–152. [in Ukrainian].
- [7] Skorniyakov, E.S., & Cherneta, O.G., & Volochshyk, R.G. (2015). *Vidnovlennya kulachkiv rozpodilnih valiv elektrodugovoyu naplavkoyu [Perspektivni tehnologii ta priladi]* *Zbirnik naukovih prats*, 7(2) 113–116. [in Ukrainian].
- [8] Cherneta, O.G., & Kubich, V.I., & Skorniyakov, E.S. (2017). *Analiz mehanizmov uprochneniya sredneuglerodistih stalel [Perspektivni tehnologii ta priladi]* *Zbirnik naukovih prats*, 11(2) 142–146. [in Ukrainian].
- [9] Cherneta, O.G., & Suhomlin, V.I., & Kalinichenko, S.V. (2019) *Doslidchshennya vidnovlenogo poverhnevogo sharu detaley iz stali 45 zmitsnyuchoyu obrobkoyu na znosostiykosti [Matematichne modelyuvannya]* *Naukoviy chshurnal*, 1(40) 194–199. [in Ukrainian].
- [10] Cherneta, O., & Kubich, V., & Volochshuk, R., & Sasov, O., & Korzhavin, Yu. (2018). *Condition for the formation of wear-resistant structures when strengthening the surface layers of parts [International Journal of Engineering Technology]*, 7(4.3), 76-80.
- [11] Cherneta, O., & Kubich, V., & Volochshuk, R., & Averyanov, V., & Shmatko, D. (2018). *Strengthening of the restored surface layer of steel parts 45 by laser boribg [International Journal of Engineering Technology]*, 7(4.3), 71-75.
- [12] Kragelskiy, I.V., & Dobichin, M.N., & Kombalov, V.S. (1977) *Osnovi raschetov na trenie i uznos* M.: Inchshenerna mehanika [in Rosiya].
- [13] Semenov, V.I., & Shuster, L.S., & Chertovkih, S.V., & Raab, G.I. (2005). *Vliyanie kompleksnogo parametra plastichnostu na kontaktnoye treniye I strukturu materialov na prognosirovanie adgeziionnih svyazey. [Trenie i iznos](Vols.26(1))*74-79.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БОРУВАННЯ СТАЛІ 45 НА ПАРАМЕТРИ АДГІЗНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ХРОМО І ХРОМО-НІКЕЛЕВИМИ СТАЛЯМИ****Чернета О.Г., Кубіч В.І., Щербіна М.А., Авер'янов В.С., Шматко Д.З.****Реферат**

Контактна взаємодія робочих поверхонь металів при здійсненні передачі та перетворення рухів здійснюється з втратами на тертя, які визначаються молекулярною та механічною складовою. Це стосується і поверхонь, які модифіковані легуючими елементами, процентний вміст яких впливає на термодинамічний потенціал поверхневих та при поверхневих шарів. Визначення впливу поверхневого борування сталі 45 на зміну параметрів адгезійного зв'язку  $\tau_0$  та  $\beta$  з хромо, хромо-нікелевими сталями з варіантною твердістю поверхневих шарів при моделюванні зсувного опору, де на першому етапі пропонується проведення порівняльного дослідження без мастильних матеріалів. При застосуванні технології поверхневого насичення бором виходить, що варіантність механічних властивостей сталі 45 і прояв параметрів молекулярної складової як в умовах мащення, так й без нього при контактній взаємодії з поверхневими шарами інших металів з варіантною твердістю буде мати різні значення. Для відновлення робочої поверхні кулачків с сталі 45 використовували електроди ОЗШ-3 з наступним хімічним складом (С — 0,4%; Мп — 0,5%; Si — 1,9%; Cr — 9,9%; S — 0,013%; P — 0,021%). В перехідній зоні залишковий аустеніт трансформується у ферит з утворенням двох фаз: часток фериту (темні каскади) і фази «бор + вуглець» — карбід бору (білі вкраплення). Параметри молекулярної складової запропоновано визначати у відповідності з методикою роботи на адгезіометрі ОТ-1 та на пристрої із застосуванням сферичного індентора, які передбачають виміри моменту тертя  $M_T$ .

Момент тертя визначався середнім статистичним з відповідними дисперсіями за кількістю дослідів ( $n=8$ ) при двох швидкостях зсуву:  $v_1 = 10,16 \pm 0,8$  мм/с,  $v_2 = 5,08 \pm 0,6$  мм/с. Середня статистична дисперсія  $\tau$  мала значення  $D_{\min} = 0,5$  МПа,  $D_{\max} = 1,13$  МПа.

Борування суттєво впливає на зміну параметрів адгезійного зв'язку. Параметр  $\tau_0$  мала тільки трибологічна система матеріалів «45ХН2МФА – сталь 45», за виключенням режиму взаємодії при швидкості зсуву  $5,08 \pm 0,6$  мм/с.

Для інших трибологічних систем матеріалів параметр  $\tau_0$  мав місце тільки при збільшенні тиску у контакти до відповідних значень, які також відрізняються як від характеристик модифікування, так і від твердості контактуючих поверхонь.

Також, встановлено неоднозначний вплив швидкості зсуву на прояв параметрів адгезійного зв'язку. Так для трибологічної системи «12Х2Н4 - сталь 45» та «40Х - сталь 45» при зменшенні швидкості зсуву майже в 2 рази значення  $\beta$  суттєво не змінювалось, проте як у системі «45ХН2МФА – сталь 45» збільшувалось при насиченні бором в 2,8 рази, а карбідом бору в 1,58 рази. Стосовно тисків, при яких  $\tau > 0$ , то вони суттєво: - зменшуються при насиченні бором в 2,46 рази для системи «40Х – сталь 45», в 2 рази для «12Х2Н4 - сталь 45»; - збільшуються при насиченні карбідом бора в 1,9 рази для «40Х - сталь 45».

**Література**

1. Франценюк И.В., Франценюк Л.И. Альбом микроструктур чугунок, стали, цветных металлов и их сплавов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 192 с.
2. Малинов Л.И. Дифференцированные обработки сплавов для повышения их свойств – перспективное направление в материаловедении. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. ЗНТУ. 2012. №2'. С.50–56.
3. Девойно О.Г. Технологии формирования износостойких покрытий с помощью лазерной обработки. Минск; УП «Технология», 2001. 273 с.
4. Чернета О.Г., Бабко І.О., Чалдишев Є.В. Дослідження технологічних способів формування зносостійких покриттів на основі лазерної обробки. *Перспективні технології та прилади*. ЗНП ЛНТУ. 2014. №5(2). С. 171–176.

5. Чернета О.Г., Сухомлін В.І., Волощук Р.Г., Серета Б.П. Дослідження мікроструктури зношених деталей автомобілів із сталі 45 при відновленні і багатократній термічній обробці. *Перспективні технології та прилади*. ЗНП ЛНТУ. 2017. №10(1). С. 212–216.
6. Чернета О.Г., Сухомлін В.І., Коробочка О.М. Аналіз трансформації мікроструктури поверхневого шару із сталі 45 в залежності від технологічних методів обробки. *Перспективні технології та прилади*. ЗНП ЛНТУ. 2017. №11(2). С. 147–152.
7. Скорняков Е.С., Чернета О.Г., Волощук Р.Г. Відновлення кулачків розподільних валів електродуговою наплавкою. *Перспективні технології та прилади*. ЗНП ЛНТУ. 2015. №7(2). С. 113–116.
8. Чернета О.Г., В.И. Кубич, Скорняков Э.С. Анализ механизмов упрочнения среднеуглеродистых сталей. *Перспективні технології та прилади*. ЗНП ЛНТУ. 2017. №11(2). С. 142-146.
9. Чернета О.Г., Сухомлін В.І., Калініченко С.В. Дослідження відновленого поверхневого шару деталей із сталі 45 із зміцнюючою обробкою на зносостійкість. *Науковий журнал «Математичне моделювання»*. ДДТУ. 2019. № 1 (40). С. 194–199.
10. Cherneta O., Kubich V., Voloshchuk R., Sasov A., Korzhavin Yu.. Condition for the formation of wear-resistant structures when strengthening the surface layers of parts. *International Journal of Engineering Technology*. 2018. 7(4.3). P. 76–80.
11. Cherneta O., Kubich V., Voloshchuk R., Averyanov V., Shmatko D. Strengthening of the restored Surface layer of steel parts 45 by laser boribg. *International Journal of Engineering Technology*. 2018. 7(4.3). P. 71–75.
12. Крагельский В.И., Добучин В.С., Комбалов М.Н. Основы расчетов на трение и износ./ М. Инженерная механика, 1977. 526 с.
13. Семенов В.И., Шустер Л.С., Чертовских С.В., Рааб Г.И. Влияние комплексных параметров пластичности на контактное трение и структуру материалов на прогнозирование адгезионных связей. *Трени и износ*. 2005. №26(1). С. 74–79.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185097

UDC 621.785.5: 621.793.6

**B.P. Sereda**<sup>1</sup>, Doctor of Tech. Sci., Prof., seredabp@ukr.net

**O.P. Maksimenko**<sup>1</sup>, Prof., D.Sc., seredabp@ukr.net

**A.S. Gaidaenko**<sup>2</sup>, General director PJSC YUZKOKS, seredabp@ukr.net

**D.B. Sereda**<sup>1</sup>, Cand. Tech. Sci., seredabp@ukr.net

<sup>1</sup>Dniprovsky State Technical University, Kamianske

<sup>2</sup>Private joint-stock company Yuzkoks, Kamianske

## MODELING OF THE GASEOUS ENVIRONMENT TO OBTAIN ALUMINIZED COATINGS DOPED WITH CHROMIUM UNDER NON-STATIONARY TEMPERATURE CONDITIONS

*The purpose of this work is thermodynamic modeling of obtaining alitinated coatings doped with chromium under the conditions of self-propagating high-temperature synthesis. Investigation of the mechanism of forming a protective coating on structural materials was carried out using the method of thermodynamic analysis of possible chemical reactions between the components of the system. For this purpose, the interaction of the gas saturated medium formed in the SHS process and the material was calculated. For thermodynamic analysis of the SHS process of forming alitinated coatings, we use the universal program of calculation of multicomponent heterogeneous systems TERRA, created on the basis of the ASTRA-4 program under the environment WINDOWS and worked out for high-temperature processes. Unlike traditional methods in chemical thermodynamics, methods of calculating the equilibrium parameters using Gibbs energy, equilibrium constants, and Goldberg and Vage law, the universal program of TERRA thermodynamic calculations is based on the maximum entropy principle for isolated thermodynamics. It is characterized by a maximum of entropy in terms of thermodynamic degrees of freedom, which include concentrations of system components, temperature, pressure.*

**Keywords:** chrome; thermodynamics; modeling; synthesis; coatings; aluminum.

*Метою даної роботи є термодинамічне моделювання отримання алітованих покриттів, легованих хромом, в умовах саморозповсюджувального високотемпературного синтезу. Дослідження механізму формування захисного покриття на конструкційних матеріалах проводилось методом термодинамічного аналізу можливих хімічних реакцій між компонентами системи. Для цього було розраховано взаємодію газового середовища, що утворюється в процесі СВС, і матеріалу. Для термодинамічного аналізу процесу СВС формування алітованих покриттів ми використовуємо універсальну програму розрахунку багатоконпонентних різномірних систем TERRA, створену на основі програми ASTRA-4 в середовищі WINDOWS та розроблену для високотемпературних процесів. На відміну від традиційних методів хімічної термодинаміки, методів обчислення параметрів рівноваги за допомогою енергії Гіббса, констант рівноваги та закону Гольберга та Ваге, універсальна програма термодинамічних обчислень TERRA заснована на принципі максимальної ентропії для ізольованої термодинаміки. Він характеризується максимальною ентропією з точки зору термодинамічних ступенів свободи, що включає концентрації компонентів системи, температуру, тиск.*

**Ключові слова:** хром; термодинаміка; моделювання; синтез; покриття; алюміній.

### Formulation of the problem

The study of the protective coating formation mechanism on structural materials was carried out using the method of thermodynamic analysis of possible chemical reactions between system components. For this, a calculation was made of the interaction of a gas saturated medium formed in the SHS process and the material. For the thermodynamic analysis of the SHS process of forming alitinated coatings, the universal program for calculating multicomponent heterogeneous systems TERRA, created on the basis of the ASTRA-4 program [1—5] under the WINDOWS medium, and developed for high-temperature processes, is used. In contrast to the methods traditionally used in chemical thermodynamics for calculating equilibrium parameters using Gibbs energy, equilibrium constants, and

the Goldberg and Wage mass laws, the TERRA universal thermodynamic calculation program is based on the principle of maximum entropy for isolated thermodynamic systems in equilibrium. It is characterized by a maximum of entropy in thermodynamic degrees of freedom, which include the concentration of system components, temperature, and pressure.

#### Analysis of recent research and publications

In the course of one SHS reaction, the thermodynamic calculation [6] of the adiabatic interaction temperature  $T_{ad}$  is grounded on the following assumption [7]: the reaction proceeds completely (with a conversion satellite of 100%) under adiabatic conditions, that is, the heat of reaction at the initial temperature  $T_0$  ( $T_0 > 298$  K) consumed by heating to  $T_{ad}$  and possibly melting products. The calculation reduces to determining the value of  $H_0$  from the nonlinear equation of balance of enthalpy:

$$\Delta H_{T_0}(r) = \sum_r \left[ \Delta H_{298}^0(r) + \int_{298}^{T_0} c_p(r) dT \right] = \Delta H_{T_{cd}}(pr) =$$

$$= \sum_{pr} \left[ \Delta H_{298}^0(pr) + (1 - x_m) \int_{298}^{T_{cd}} c_p(pr_s) dT + x_m \left( \int_{298}^{T_{cr}} c_p(pr_m) dT + \Delta H_m(pr_m) + \int_{T_{cr}}^{T_{cd}} c_p(pr_m) dT \right) \right], \quad (1)$$

where  $H_{298}^0$  — standard enthalpy of substance formation (for elements  $\Delta H_{298}^0 = 0$ );  $\Delta H_m$  and  $T_m$  — heat and melting point;  $c_p$  — heat capacity;  $x_m$  — the mole fraction of the melt in the reaction products;  $r$  — reagent;  $pr$  — reaction products; the lower indices  $s$  and  $w$  refer to solids and melt, respectively.

As can be seen from formula (1), the value of  $T_{ad}$  is determined by the difference between the initial enthalpy of the system and its enthalpy in the equilibrium state at  $T_{ad}$ . However, this approach is valid only for a small number of reagents and possible reactions and is not suitable for multicomponent heterogeneous systems in which several competing reactions can occur simultaneously with the formation of various products. In addition, the possibility of an incomplete conversion is not taken into account in formula (1): as you know, not a single reaction proceeds completely — an equilibrium is always established between products and reagents at a certain concentration of both.

Therefore, for multiphase multicomponent systems, it is necessary to apply other methods for calculating thermodynamic equilibrium. In recent years, computer programs with thermodynamic databases (TBD) have been used for HMs, based on the search for the minimum Gibbs energy of a multiphase multicomponent system [8, 9, 10–13]. In this case, TM is reduced to searching for compounds in LDP that can be formed from the elements that make up the starting materials and determining their quantitative ratio, which corresponds to equilibrium under given conditions. For SHS processes in multicomponent systems at the Institute of Structural Macrokinetics and Problems of Materials Science of the Russian Academy of Sciences, a specialized program ISMAN-THERMO has been developed, which allows conducting HM only in adiabatic mode [10, 11]. Developed at MSTU. N.E. Bauman's universal program ASTRA-4 searches for the equilibrium composition, corresponds to the condition of a local maximum of the entropy of the system  $S$  if there are restrictions (the condition of conservation of the mass of each element and the total internal energy of the system) for a given initial composition and thermodynamic regime [12, 13].

#### Results

The purpose of this work is to obtain the equilibrium composition of the products of the system for alliteration during thermal self-ignition under conditions of self-propagating high-temperature synthesis. Powder saturating charge in alliteration under SHS conditions [14–20] has a chromium component, aluminum, gas transport activators, as well as titanium, chromium and silicon.

Comparative thermodynamic evaluation of copper saturation by gas and gas method determines the feasibility of using one of these methods of saturation of copper and its alloys with silicon, aluminum, titanium, chromium and nickel.

The equilibrium composition of SHS-charge in the mode of thermal auto-ignition was calculated for the system: 20% XC + 15% Al + 5% Cr + 55%  $Al_2O_3$  + 2%  $NH_4I$  + 3 $AlF_3$ . For a large range of source component changes as a function of temperature.



As a result of the combustion of powder mixtures with GTA, it is possible to form a gas phase containing compounds I<sub>2</sub>, Cl, F with the chemical elements included therein. With increasing temperature there is an increase in the number of halides (Figs. 1, 2). This confirms the possibility of transferring alloying elements to form coatings.

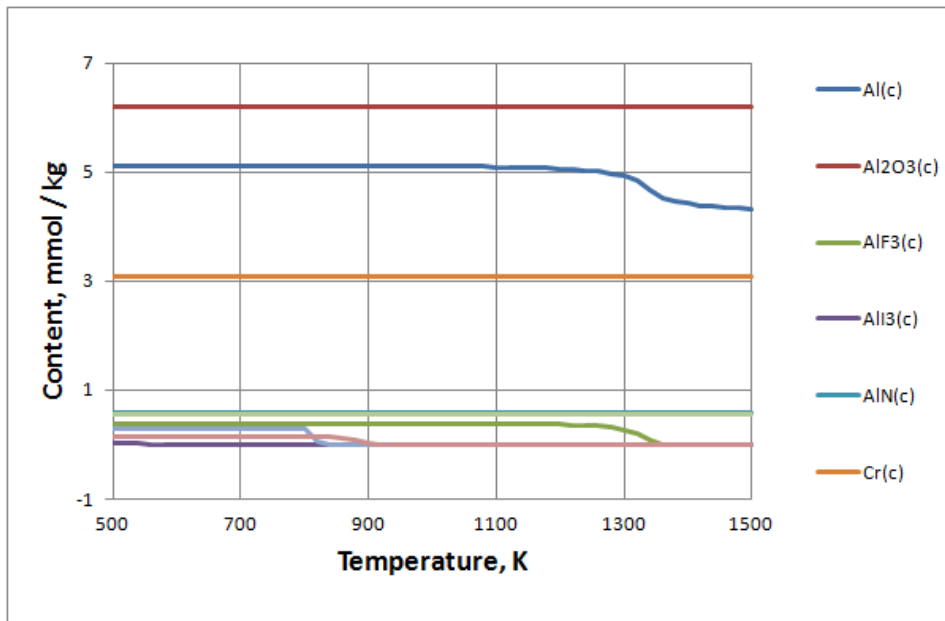


Fig. 1. The content of condensed products in the reactor, in the mode of SHS-charge for system: 20% XC + 15% Al + 5% Cr + 55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% NH<sub>4</sub>I + 3AlF<sub>3</sub>

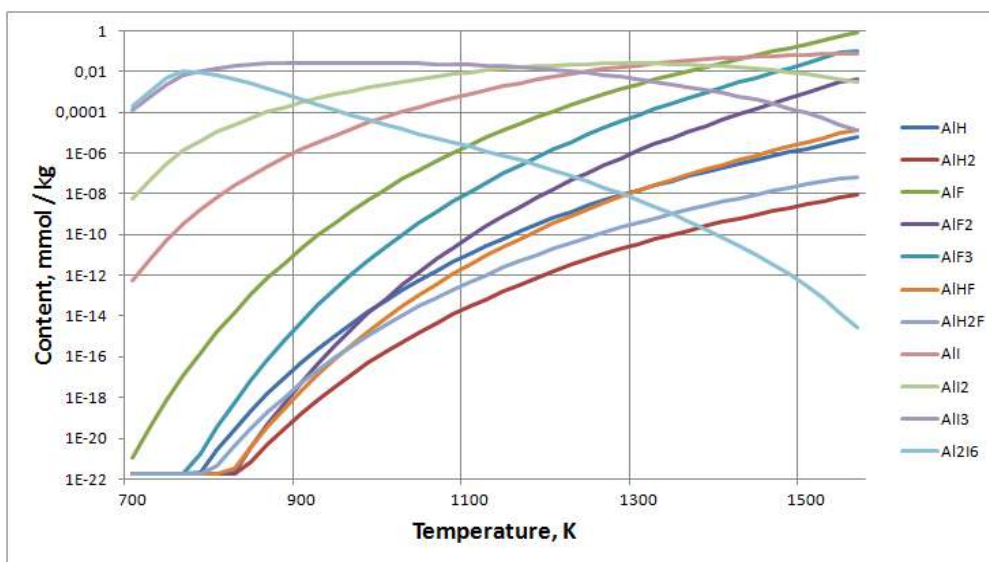


Fig. 2. The content of gaseous aluminum compounds in the reactor, in the mode of SHS-charge for the system: 20% XC + 15% Al + 5% Cr + 55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% NH<sub>4</sub>I + 3AlF<sub>3</sub>

With increasing temperature, the number of products in the gaseous phase increases and condensed products are released. It is noteworthy that in the temperature range of 700—1600 K, the fraction of the condensed phase falls, which is due to the evaporation of the carrier. At the same time, starting at 800 K, there is a decay of reaction products, which confirms the appearance of decomposition products and a sharp increase in the number of moles of gas.

The gaseous products interacting with the elements of the powder system are transferred to the gas phase. At temperatures above 800 K, the fraction of the condensed phase is almost unchanged. This fact suggests that in the temperature range of 700—1600 K, condensed phase evolution occurs, but without changing the number of moles, which is characteristic of decay reactions, exchange with the substrate, that is, chemical element transport occurs.

The content of gaseous aluminum compounds in the reactor in the mode of self-ignition SHS-charge for the system: 20% XC + 15% Al + 5% Cr + 55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% NH<sub>4</sub>I + 3AlF<sub>3</sub>. In the temperature range 700—1600 K c: AlH, AlH<sub>2</sub>, AlH<sub>3</sub>, AlF, AlF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, AlHF, AlH<sub>2</sub>F, AlI, AlI<sub>2</sub>, AlI<sub>3</sub>, etc. The content of chromium gas compounds: Al(c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c), AlF<sub>3</sub>(c), AlI<sub>3</sub>(c), AlN(c), Cr(c), Cr<sub>2</sub>(c), CrI(c), Ti(c) and others. The content of chromium gas compounds: Cr, Cr<sub>2</sub>, CrO, CrH, CrOH, CrF, CrF<sub>2</sub>, CrF<sub>3</sub>, CrI, CrI<sub>2</sub>, CrI<sub>3</sub> etc., as well as the content of condensed products: Al(c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c), AlF<sub>3</sub>(c), AlI<sub>3</sub>(c), AlN(c), Cr(c) etc.

### Conclusions

As a result of thermodynamic calculation of the equilibrium composition of the reaction products, kinematic schemes of chemical transformations in the studied systems were obtained. Condensed and gaseous compounds have been identified. It is proved that in the temperature range 700—1600 K reactions occur with condensed phase separation, but without changing the number of moles, which is characteristic of decay reactions, exchange with structural material, ie chemical transport of elements takes place.

### References

- [1] Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х т. / Л. В. Гурвич, И. В. Веж, В. А. Медведев и др. – М.: Наука, 1978.
- [2] JANAF Thermochemical Tables (Third Edition). J.Phys. Chem. Ref. Data vol.14 (1985) Suppl. No.1. (см. также NIST Chemistry WebBook: <http://webbook.nist.gov>).
- [3] Edil'baev A.I. Issledovanie vozmozhnosti obezhelezivaniya margancevykh koncentratov / Vestnik Nacional'noj inzhenernoj akademii RK Almaty., 2008. – № 4. – S. 125–133.
- [4] Primenenie EHVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov / Sinyarev G.B., Vatolin N.A., Trusov B.G., Moiseev R.K. i dr.]. – М.: Nauka, 1982. – 263 p.
- [5] Zmij V.I., Ruden'kij S.G. Osobennosti vakuumnogo aktivirovannogo diffuzionnogo nasyshcheniya metallov: termodinamika, mekhanizm i kinetika. *Metallofizika i novejschie tekhnologii.*, 1998. – № 10. – P. 69–75.
- [6] Lovshenko F.G., Lovshenko G.F., Hina B.B, Lovshenko 3.M., Lozikov I.A. Termodinamicheskoe modelirovanie geterogennogo vzaimodejstviya pri mekhanicheskom legirovanii v sistemah na osnove medi. *Vestnik Belorussko-Rossijskogo universiteta.*, 2012. № 1(34). P. 23–35.
- [7] Primenenie EHVM dlya termodinamicheskikh raschetov metallurgicheskikh processov / G. B. Sinya-r v [i dr.]. – М.: Nauka, 1982. – 264 p.
- [8] Mason, P., Mignanelli M. Modeling thermodynamic processe. *Advanced Materials and Processes.*, 1998. Vol. 153, №. 4. P. 21–24.
- [9] Shiryayev, A. Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach / A. Shiryayev // International Journal of SHS. 1995. № 4. P. 351–362.
- [10] Barin, I., O. Knacke, Kubashevski O. Thermochemical Properties of Inorganic Substances. Supplement. – Berlin: Springer-Verlag, 1977. – 243 p.
- [11] Термодинамические свойства неорганических веществ: справочник / У.Д. Верытин [и др.]: Atomizdat, 1965. – 460 p.
- [12] Термические константы веществ / Под ред. В.И. Глушко М. VINITI, 1979 – 197 p.
- [13] Термодинамические свойства индивидуальных соединений / Под ред. В. И. Глушко. – М.: Nauka, 1982. – Т. Barin, I. Thermochemical Data of Pure Substances. Third Edition. – New York: VCH Publishers, Inc., 1995. – 2003 p.

- [14] Sereda B., Kryglyak I., Sereda D. Production of highly effective SHS coatings operating in oxidizing and corrosive environments *Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017. P.424–429*
- [15] Sereda B., Kovalenko A., Kryglyak I., Sereda D. Simulation and modeling of metallurgical phenomena produced on pressing in SHS-condition. *Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017. P.727–732*
- [16] Sereda B., Sereda D. Establishment of the relationship between the microstructure characteristics and the heat resistance of silicate coatings obtained under SHS conditions. *Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017. P.412–416*
- [17] Sereda B., Sereda D. Corrosion Resistance and Mechanical Properties Zinc Coating Sheet Steels, Received in Conditions of Self-propagating High Temperature Synthesis. *Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. P.825–829.*
- [18] Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy. *Material science and technology – 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016. P.931–934.*
- [19] Sereda B., Sereda D. Modeling deformation in material processing and laws of phasic by SHS pressing intermetallics alloys. *Material science and technology. Columbus. Ohio, USA 2015. P.611–617.*
- [20] Sereda B., Sereda D. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. *Material science and technology – 2015. Columbus, OH, USA. 1821p, P.229–232.*

#### **МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ ОТРИМАННЯ АЛІТОВАНИХ ПOKPИTTIB, ЛЕГОВАНИХ ХРОМОМ ПРИ НЕСТАЦІОНАРНИХ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВАХ**

**Серета Б.П., Максименко О.П., Гайдаєнко О.С., Серета Д.Б.**

##### **Реферат**

Для термодинамічного аналізу СВС-процесу формування алітованих покриттів використовується універсальна програма розрахунку багатокомпонентних гетерогенних систем TERRA, створена на основі програми АСТРА-4 під середовище WINDOWS і відпрацьована для високотемпературних процесів. На відміну від традиційних у хімічній термодинаміці методів розрахунків параметрів рівноваги з використанням енергії Гиббса, констант рівноваги та закону діючих мас Гольдберга і Ваге, універсальна програма термодинамічних розрахунків TERRA, базується на принципі максимуму ентропії для ізольованих термодинамічних систем, що перебувають у стані рівноваги. Дослідження механізму формування захисного покриття на конструкційних матеріалах здійснювали, використовуючи метод термодинамічного аналізу можливих хімічних реакцій між компонентами системи. Для цього був виконаний розрахунок взаємодії газового насичуючого середовища, що утворюється в матеріалі при СВС-процесі. Воно характеризується максимумом ентропії щодо термодинамічних ступенів свободи, до яких відносяться концентрації компонентів системи, температура, тиск.

Зі збільшенням температури кількість продуктів в газоподібній фазі зростає і виділяються конденсовані продукти. Характерно, що в області температур 700–1600 К частка конденсованої фази падає, що пов'язано з випаровуванням носія. Одночасно, починаючи з температури 800 К, відбувається розпад продуктів реакції, що підтверджує поява продуктів розкладання і різке збільшення кількості молей газу. Газоподібні продукти, взаємодіють з елементами порошкової системи переводять в газову фазу. При температурах вище 800 К частка конденсованої фази практично не змінюється. Цей факт дає підставу припустити, що в температурному інтервалі 700–1600 К відбуваються реакції з виділенням конденсованої фази, але без зміни числа молей, що характерно для реакцій розпаду, обміну з підкладкою, тобто по суті відбувається хімічний транспорт елементів.

Вміст газоподібних сполук алюмінію в реакторі в режимі теплового samozапалювання СВС–шихти для системи: 20% XC + 15% Al + 5% Cr + 55% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 2% NH<sub>4</sub>I + 3AlF<sub>3</sub>

В діапазоні температур 700–1600 К є: AlH, AlH<sub>2</sub>, AlH<sub>3</sub>, AlF, AlF<sub>2</sub>, AlF<sub>3</sub>, AlHF, AlH<sub>2</sub>F, AlI, AlI<sub>2</sub>, AlI<sub>3</sub>, і ін. Вміст газоподібних сполук хрому: Al(c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c), AlF<sub>3</sub>(c), AlI<sub>3</sub>(c), AlN(c), Cr(c), Cr<sub>2</sub>(c), CrI(c), Ti(c), та ін. Вміст газоподібних сполук хрому: Cr, Cr<sub>2</sub>, CrO, CrH, CrOH, CrF, CrF<sub>2</sub>, CrF<sub>3</sub>, CrI, CrI<sub>2</sub>, CrI<sub>3</sub> і ін., а також вміст конденсованих продуктів: Al(c), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(c), AlF<sub>3</sub>(c), AlI<sub>3</sub>(c), AlN(c), Cr(c) і ін.

В результаті термодинамічного розрахунку рівноважного складу продуктів реакції отримано кінематичні схеми хімічних перетворень у досліджуваних системах. Визначено конденсовані та газоподібні сполуки. Доказано, що в температурному інтервалі 700–1600 К відбуваються реакції з виділенням конденсованої фази, але без зміни числа молей, що характерно для реакцій розпаду, обміну з конструкційним матеріалом, тобто відбувається хімічний транспорт елементів.

### Література

1. Термодинамические свойства индивидуальных веществ: Справочное издание в 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. – М: Наука, 1978.
2. JANAF Thermochemical Tables (Third Edition). J.Phys. Chem. Ref. Data vol.14 (1985) Suppl. No.1. (см. также NIST Chemistry WebBook: <http://webbook.nist.gov>).
3. Едильбаев А.И. Исследование возможности обезжелезивания марганцевых концентратов / Вестник Национальной инженерной академии РК Алматы., 2008. – № 4. – С. 125–133.
4. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / [Синярев Г.Б., Ватолин Н.А., Трусов Б.Г., Моисеев Р.К. и др.]. – М.: Наука, 1982. –263 с.
5. Змий В.И., Руденький С.Г. Особенности вакуумного активированного диффузионного насыщения металлов: термодинамика, механизм и кинетика. *Металлофизика и новейшие технологии*. 1998 – № 10. – С. 69–75.
6. Ловшенко Ф.Г., Хина Б.Б., Ловшенко З.М., Лозиков И.А. Термодинамическое моделирование гетерогенного взаимодействия при механическом легировании в системах на основе меди Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. – № 1(34). – С. 23–35.
7. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев в [и др.]. – М.: Наука, 1982. 264 с.
8. Mason, P. Mignanelli M. Modeling thermodynamic processes. *Advanced Materials and Processes.*, 1998. Vol. 153, №. 4. . 21–24.
9. Shiryaev, A. Thermodynamics of SHS processes: An advanced approach. *International Journal of SHS*. 1995. № 4. P. 351–362.
10. Barin, I., O. Knacke, O. Kubashevski *Thermochemical Properties of Inorganic Substances. Supplement.* – Berlin: Springer-Verlag, 1977. 243 p.
11. Термодинамические свойства неорганических, веществ: справочник / У.Д. Верятин [и др.]. – Атомиздат, 1965. – 460 с.
12. Термические константы веществ / Под ред. В.П. Глушко М. ВИНТИ, 1979–197 с.
13. Термодинамические свойства индивидуальных соединений /Под ред. В.П. Глушко. – М.: Наука, 1982. – Т. Barin, I. *Thermochemical Data of Pure Substances / I. Barin // Third Edition.* – New York: VCH Publishers, Inc., 1995. Sereda D., 2003 p.
14. Sereda B., Kryglyak I., Sereda D. Production of highly effective SHS coatings operating in oxidizing and corrosive environments. *Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017.* P.424–429
15. Sereda B., Kovalenko A., Kryglyak I., Sereda D. Simulation and modeling of metallurgical phenomena produced on pressing in SHS-condition. *Material science and technology - 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017.* P.727–732
16. Sereda B., Sereda D. Establishment of the relationship between the microstructure characteristics and the heat resistance of silicate coatings obtained under SHS conditions. *Material science and technology – 2017. Pittsburgh. Pennsylvania USA. 2017.* – P.412–416

17. Sereda B., Sereda D. Corrosion Resistance and Mechanical Properties Zinc Coating Sheet Steels, Received in Conditions of Self-propagating High Temperature Synthesis *Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016.* – P.825–829.
18. Sereda B., Sereda D. Development of Protective Coatings Formulations Based on Boron for Units Operating at High Temperatures in Metallurgy *Material science and technology- 2016. Salt Lake City, Utah USA 2016.* – P.931–934.
19. Sereda B., Sereda D. Modeling deformation in material processing and laws of phasic by SHS pressing intermetallics alloys *Material science and technology. Columbus. Ohio, USA 2015.* – P.611–617.
20. Sereda B., Sereda D. Advanced Chromoaluminizing Coatings for Wear and Heat-resistance on Composite Materials under SHS. *Material science and technology-2015. Columbus, OH, USA.* – 1821p., P.229–232.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185101

UDC 621.18:622

**S.K. Meshchaninov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, sergey.meshaninov@mail.ru

**R.V. Voloshin**, magister

**D.S. Krivencov**, magister, STRANNIK1997@mail.ru

Dnieper State Technical University, Kamianske

## MATHEMATICAL MODELING OF CONTINUOUS METAL BEHAVIOR WITH DEFECTS OF MACROSTRUCTURE IN THE ROLLING PROCESS

*The mathematical model of the process of rolling a continuous cast billet with defects of macrostructure on a smooth barrel and in calibers is presented. The boundary conditions are given by the speed of rotation of the rolls, the restriction of degrees of freedom of the workpiece and the rolls, as well as the coefficient of friction on the contact surface of the rolls-workpiece. For hot rolling, it was considered permissible to consider rolling rolls as a rigid, non-deformable rigid body. For the workpiece material used an elastic-plastic model of environmental behavior. There have been two cases considered: rollerless rolling on a smooth barrel and rolling in rectangular caliber. The roll material is steel, the surface is smooth. On the example of rolling in the first pass of the crimp mill, a comparative analysis of caliber rolling and rolling in calibers was carried out. It is shown that rolling on a smooth barrel has the potential to be used in the case of rolling continuous casting with macrostructure defects. The influence of the basic rolling parameters: absolute compression and temperature on the "healing" of macrostructure defects is made.*

**Keywords:** rolling; defects; continuous casting; mathematical modeling; crimp; caliber.

*Наведено та створено математичну модель процесу прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури на гладкій бочці і в калібрах. Граничні умови задаються швидкості обертання валків, обмеження ступенів свободи заготовки і валків, а також коефіцієнтом тертя на поверхні контакту валок-заготовка. Для гарячої прокатки вважалось допустимим розглядати прокатні валки як жорстке тверде тіло, що не деформується. Для матеріалу заготовки використана пружно-пластична модель поведінки середовища. Було розглянуто два випадки: бескалібрової прокатки на гладкій бочці і прокатки в прямокутному калібрі. Матеріал валків – сталь, поверхня гладка. На прикладі прокатки в першому проході обтискової групи стана проведений порівняльний аналіз бескалібрової прокатки і прокатки в калібрах. Доведено що прокатка на гладкій бочці має потенціал для використання в разі прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури. Виконана оцінка впливу основних параметрів прокатки: абсолютне обтиснення і температура на «заліковування» дефектів макроструктури.*

**Ключові слова:** прокатка; дефекти; безперервнолита заготовка; математичне моделювання; обтискна кліть; калібр.

### Problem's Formulation

In conditions of constant technological innovation and globalization of markets in front of enterprises, rolled metal manufacturers the problem of increasing production efficiency and ensure competitive products in demand quality. The use of continuous cast billets (CCB) of small cross section revealed a number of problems that did not previously occur with using hot rolled. In the greatest degrees this is typical for cases of production long products from quality structural and spring-spring brands steels. Formulation of the problem. CCB defects formed during solidification and may to develop both inside the cast billet and on outer surface.

### Analysis of recent research and publications

In most cases defects have a negative effect on production causing rejection or increase production costs as a result the need to bring blanks in line with the required specifications before they by rolling. Defects expending on the cause can be divided into two groups [1—3]:

– defects specific to a particular streams (found only on one stream due to hardware problems or its settings, for example, due to mold defects, irregularities secondary cooling, improper settings pulling and ruling rolls, etc.); defects specific to a particular swimming trunks (associated with the properties of liquid steel and caused by overheating, the presence of impurities, deoxidation at the stage of out-of-furnace steel processing). In relation to production conditions metal rolling from CCB obtained in conditions:

- high-speed varietal caster with small bending radius, average figures of marriage by type have the form: violations of the geometry of the CCB — 36.4%;
- macrostructure defects — 17.2%, cracks 31.9%;
- slag inclusions — 4.5% [2].

On many axial porosity is observed in the templates segregation strips and cracks, developed columnar structure and asymmetry of the ingot zones. In this regard, questions related to the study the behavior of defects in the macrostructure of continuously cast billets (shrink shell, gas bubbles, axial porosity) in the process deformations are relevant following the behavior of these defects in recently widespread mathematical (computer) methods simulation using software complexes like ANSYS, DEFORM, QFORM, PLAST, etc. in which modeling carried out using the finite method elements. Moreover, the variety of processes in each case requires its own approach to modeling techniques.

So in [3, 5] presented the results simulation of cutting and screw rolling processes solid blanks in the software package Deform-3D. We studied the effect on the depth of the weight work piece diameter, feed angle, roll calibration crimp mill, as well as the original shape of the ends blanks. In [4], a mathematical simulation of the process of screw firmware blanks large diameter. The aim of the work was to study with using the Deform-3D software package such parameters as a stress-strain state.

In [4], mathematical modeling of the process of screw-piercing large-diameter workpieces was carried out. The aim of the work was to study using the Deform-3D software package such parameters as the stress-strain state metal, the accumulated deformation in terms of the volume of the workpiece, the nature of the development of the deformation, power parameters, firmware time, etc.

Of great interest is the work [5—7] in which mathematical modeling of the process of metal deformation in calibers of various shapes was carried out. During the study, the influence of the stress-strain state on the flow of the deformed metal in various zones of high-quality calibers, depending on their shape, was analyzed. For modeling, the Deform-3D software package was also used. In [6], the problems of calibration design were studied in order to reduce energy consumption and reduce the likelihood of defect formation.

Thus, the aim of the work was to develop a mathematical model and conduct research into the behavior of defects in the macrostructure of continuously cast metal during rolling.

#### **Formulation of the purpose of the study**

For mathematical modeling of the behavior of macrostructure defects during rolling, a computer simulation software package using the Deform-3D finite element method was used.

The rolling process is quite complicated for modeling since it combines the rotational movement of the rolls and the translational motion of the workpiece. To obtain correct results, it is necessary to accurately position the workpiece relative to the rolling rolls and take into account the friction conditions at the contact [8—10]. It is also necessary to ensure the capture of the workpiece rolls. As the boundary conditions are set the speed of rotation of the rolls, restrictions on the degrees of freedom of the workpiece and rolls, as well as the coefficient of friction on the contact surface of the roll-workpiece. For hot rolling it is permissible to consider the rolling rolls as a rigid undeformable solid. An elastic-plastic model of the medium's behavior is used for the workpiece material. Two cases were considered: caliber-free rolling on a smooth barrel and rolling in a rectangular caliber. The material of the rolls is steel, the surface is smooth. The diameter of the rolls in both cases was 600 mm. A non-cast cast billet with a section of 150×150 mm was chosen as the initial billet, the length of the billet was 500 mm in order to exclude the influence of external zones. Central porosity was modeled through a hole with a diameter of 4, 6 and 8 mm.

The appearance of the model after import into the Deform-3D software package and positioning of the workpiece relative to the rolls is shown in Fig. 1. The geometric model of the workpiece was divided into 70,000 tetrahedral finite elements. An elastic-plastic model was chosen as a model of the behavior of the CCB material. Steel 45 was chosen as the material.

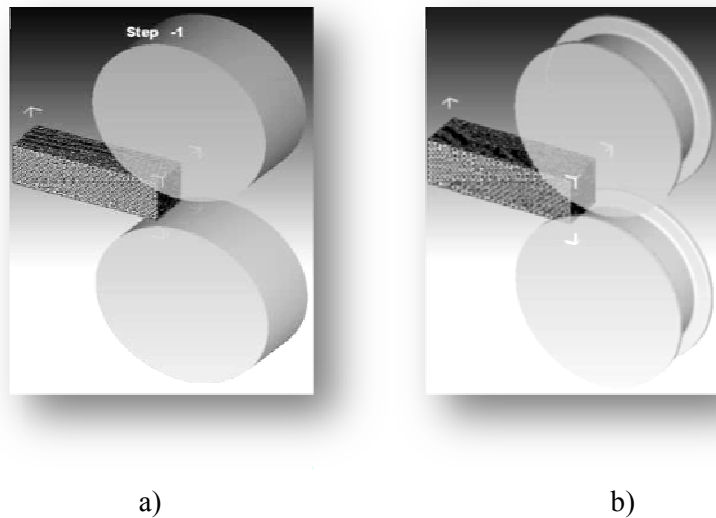


Fig. 1. Geometric rolling model: a — in smooth rolls; b — rectangular gauge

The rolling temperature of the billet was assumed equal over the entire cross section of the billet and amounted to 1000, 1100 and 1200°C. Temperature changes from contact with the rolls and the deformation process were not taken into account. As conditions on the contact, the friction coefficient was set equal to 0.4. Rolling speed — 0.1 m/s. The absolute compression ratio is 30, 40 and 50 mm. To ensure the capture of the workpiece by the rolls, a short-term pushing force was applied to the end face of the workpiece [8].

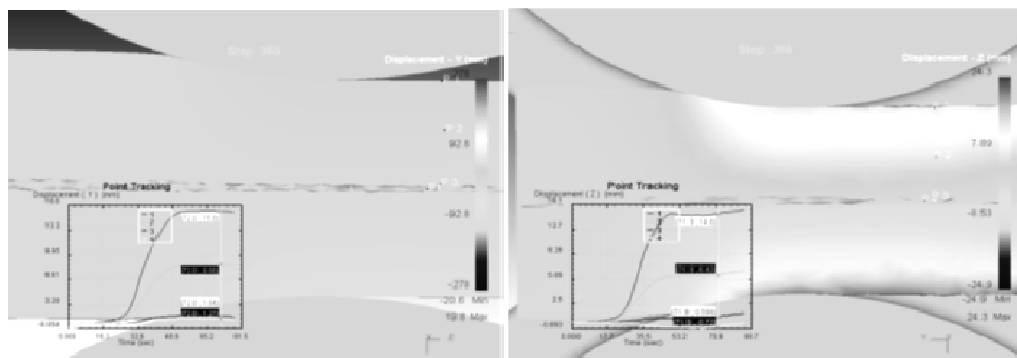
#### Presenting main material

The following parameters were selected as output parameters for the analysis of the rolling of an overburden with defects in the macrostructure in smooth rolls: absolute height strain  $\epsilon_h$ , strain rate  $\dot{\epsilon}$ , stress intensity  $\sigma$ , and the degree of accumulated strain  $\epsilon_{acc}$ . Reading these parameters from the computer model was carried out for 4 points located along the height of the workpiece: P1 is the crimped face of the workpiece, P2 is the height of the workpiece, P3 is the beginning of the axial porosity zone; P4 — axis of the workpiece. Evaluation of the effectiveness of the axial porosity rolling process was evaluated in terms of minimizing its size and creating a favorable stress-strain state [11]. Consider a comparative analysis of the rolling process in gauges and on a smooth barrel for the following combination of factors: rolling temperature  $T_{\Pi} = 1200^{\circ}\text{C}$ , absolute reduction  $\Delta h = 30$  mm. A comparative analysis of the nature of the penetration of deformation into the axial zone of the workpiece is shown in Fig. 2.

The calculation data indicate that the penetration of high-altitude deformation into the axial zone of the workpiece, and, consequently, the reduction in axial porosity, is greater in the case of rolling on a smooth barrel: 1.6 mm versus 0.6 mm. A similar effect was observed when the rolling temperature was set at 1000 and 1100°C. This allows us to conclude that the preferred use of rolling on a smooth barrel in the first passes of the crimp group of the rolling mill.

The distribution of stress intensity is shown in Fig. 3. From the above data, we can conclude that the level of stresses arising when rolling on a smooth barrel is 1.1 ... 1.3 times less than when rolling in calibers.

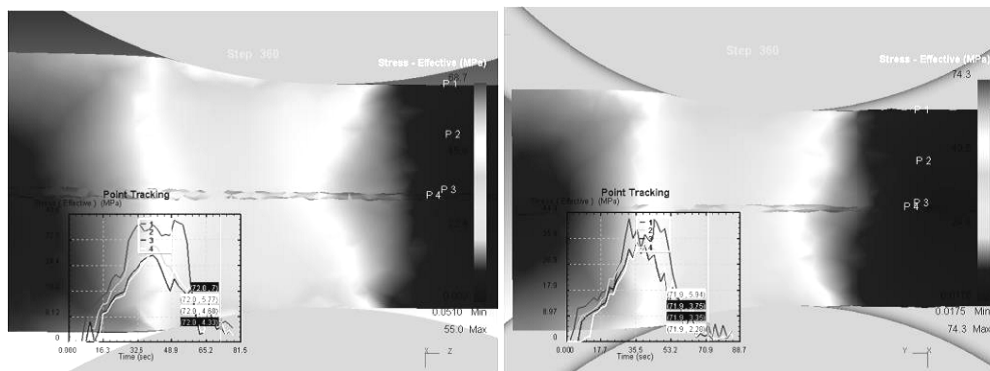




a)

b)

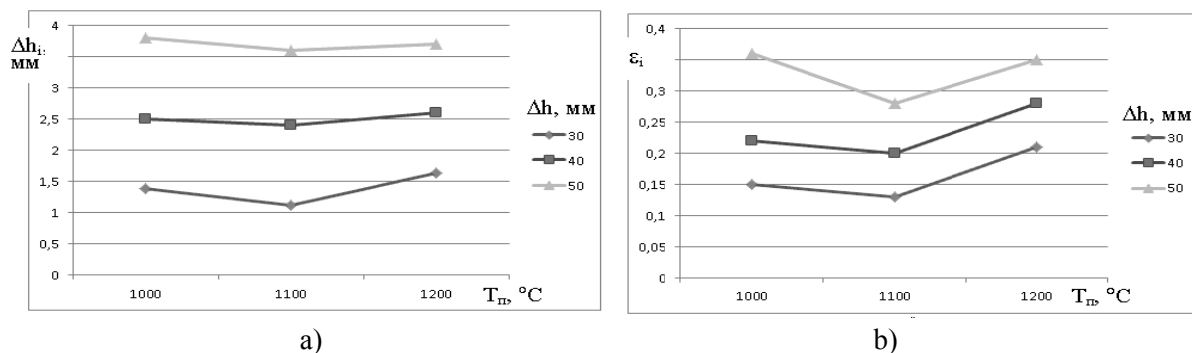
Fig. 2. Distribution of absolute deformation along the height of the roll ( $T_p = 1200^\circ\text{C}$ ,  $h = 30$  mm) during rolling: a — on a smooth barrel; b — in a rectangular caliber



a)

b)

Fig. 3. Distribution of stress intensity along the height of the roll ( $T_p = 1200^\circ\text{C}$ ,  $h = 30$  mm) during rolling: a — on a smooth barrel; b — in a rectangular caliber



a)

b)

Fig. 4. Dependence on the magnitude of the absolute compression and rolling temperature: a — penetration of high-altitude deformation; b — strain intensity; [11].

Thus, as a result of preliminary calculations, we can make an assumption about the potential of non-caliber rolling in the case of using blanks with macro-structure defects, since such rolling is characterized by greater penetration of altitudinal deformation into the axial zone of the ingot and a more favorable stress-strain state [11]. Based on the foregoing, for the initial study of the behavior of macrostructure defects during rolling, the case of rolling on a smooth barrel was chosen. The calculation results are shown in Fig. 4. As a result of the analysis of the obtained dependences, we can conclude that from the point of view of the maximum reduction in the axial porosity, the rolling tempera-

ture of 1000°C and the absolute reduction of 50 mm will be most favorable. In this case, the axial porosity is reduced to a minimum and will be eliminated during subsequent passes. At the same time, as, for example, with an absolute reduction of 30 mm, the most favorable rolling temperature is 1200°C. Thus, the most rational combination of these factors can be discussed in the case of an additional analysis of equipment capabilities and economic factors [11]. An analysis of the influence of rolling factors on the stress state indicates that the rolling temperature has a greater influence on the magnitude of the stresses, while the effect of absolute reduction is less. In any case, a lower stress level is observed when the rolling temperature is exceeded to 1200°C and the absolute reduction is reduced to 30 mm. A similar picture is also observed in the dependences of the accumulated degree of deformation, however, here the influence of temperature is less than the effect of absolute compression.

### Conclusions

A mathematical model of the rolling process of CCB with defects in the macrostructure on a smooth barrel and in gauges is developed. On the example of rolling in the first pass of the crimp group of the mill, a comparative analysis of non-caliber rolling and rolling in calibers is performed. It is shown that rolling on a smooth barrel has the potential to be used in the case of rolling of an overburden with defects in the macrostructure. The influence of the basic rolling parameters was evaluated: absolute compression and temperature on the “healing” of macrostructure defects.

### References

- [1] Botnikov, S. A. (2011). *Sovremennyj atlas defektov nepreryvnolitoj zagotovki i prichiny vozniknovenija proryvov kristallizujushhejsja korochki metalla*. Volgograd. (in Russian)
- [2] Bykov, P.O. Nikitin, G. M., Serzhanov, R.I. (2007). Kachestvo nepreryvnolityh zagotovok. Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii «Aktual'nye problemy gornometallurgicheskogo kompleksa Kazahstana». (pp. 379–383). [in Karaganda].
- [3] Ju, V., Bodrov, D.V., Ovchinnikov, B.I., Ust'jancev, A.A., Bogatov, A.V. (2009). Issledovanie nestacionarnoj stadii vintovoj prokatki nepreryvnolityh zagotovok na trehvalkovom obzhimnom stane. Trudy XVII mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoi konferencii «TRUBY – 2009». (pp. 287–288). [in Russian].
- [4] Romanenko, V.P., & Sizov, D.V. (2011). Modelirovanie processa vintovoj proshivki zagotovok bol'shogo diametra v dvuhvalkovom stane metodom konechnyh jelementov. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*. 36–40. [in Russian].
- [5] Kadykov, V.N., & Umanskij, A.A., & Mart'janov, Ju.A.. (2011). Modelirovanie processov formoizmenenija defektov pri prokatke v kalibrah. *Metallurgija: Tehnologii, upravlenie, innovacii, kachestvo. Sbornik trudov vsrossijskoj nauchno-prakticheskoi konferencii*. 146–151. [in Novokuzneck, Russian].
- [6] Kinzin, R.I., & Rychkov, S.S.. (2011) Ispol'zovanie programmnoho kompleksa DEFORM-3D pri modelirovanii processov sortovoj prokatki. *Vestnik MGTU im. Nosova*. 45–48. [in Russian].
- [7] Skljar, V.A. & Smirnov, E.N.. (2016). *Konechno-raznostnye metody v obrabotke metallov davljeniem. [Konspekt lekcij dlja studentov special'nosti]*. Staryj Oskol [in Russian].
- [8] Shljapugin, A.D.. (2010) *Modelirovanie i optimizacija tehnologicheskikh processov OMD*. Samara. [in Russian].
- [9] Minayev, A.A., Smirnov, A.N., Grigoriev, M.V.. (2002). Experimental investigation dynamics of condensation of axial zone continuous casting blooms and billets on physical models. *11-th International Metallurgical & Materials Conference “METAL - 2002”*. (pp. 218–226). Hradec nad Moravicni Czech Republic. - Ostrava: VSB - Technical University.
- [10] Tripathy, P.K., & Das, S. (2006). Migration of slab defects during hot rolling. *Iron making and Steelmaking*. 447–483 [in Russian].
- [11] Tirosh, J., & Shrizby, A., & Rubinski, I.. (1999). Evolution of anisotropy in the compliances of porous materials during plastic stretching or rolling – analysis and experiments. *Mechanics of Materials*. 449–460 [in Russian].

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТОГО МЕТАЛУ С ДЕФЕКТАМИ МАКРОСТРУКТУРИ В ПРОЦЕСІ ПРОКАТКИ** **Мещанінов С.К., Волошин Р.В., Кривенцов Д.С.**

### **Реферат**

Наведено та створено математичну модель процесу прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури на гладкій бочці і в калібрах. Граничні умови задаються швидкості обертання валків, обмеженням ступенів свободи заготовки і валків, а також коефіцієнтом тертя на поверхні контакту (валок-заготовка). Для гарячої прокатки вважалось допустимим розглядати прокатні валки як жорстке тверде тіло, що не деформується. Для матеріалу заготовки використано пружно-пластична модель поведінки середовища.

Було розглянуто два випадки: бескалібрової прокатки на гладкій бочці і прокатки в прямокутному калібру. Матеріал валків — сталь, поверхня гладка. Діаметр валків в обох випадках становив 600 мм. В якості вихідної заготовки було обрано безперервнолиту заготовку перетином 150×150 мм, довжина заготовки становить 500 мм, для того щоб виключити вплив зовнішніх зон. Центральна пористість моделювалася наскрізним отвором діаметром 4 мм, 6 мм і 8 мм. Зміна температури від контакту з валками і процесу деформації не враховувалися. В якості умов на контакт задавався коефіцієнт тертя рівний 0,4. Швидкість прокатки — 0,1 м/с. Величина абсолютного обтиску — 30 мм, 40 мм і 50 мм. На прикладі прокатки в першому проході обтискової групи стана проведено порівняльний аналіз бескалібрової прокатки і прокатки в калібрах.

Доведено що прокатка на гладкій бочці має потенціал для використання в разі прокатки безперервнолитої заготовки з дефектами макроструктури. Виконано оцінку впливу основних параметрів прокатки: абсолютне обтиснення і температура на «заліковування» дефектів макроструктури. Розглядалось два випадки: бескалібрової прокатки на гладкій бочці і прокатка в прямокутному калібрі. Матеріал валків — сталь, поверхня гладка. Діаметр валків в обох випадках становив 600 мм.

В результаті проведених досліджень було розроблено математичну модель процесу прокатки НЛЗ з дефектами макроструктури на гладкій бочці і в калібрах. На прикладі прокатки в першому проході обжимної групи сталі проведений порівняльний аналіз бескалібрової прокатки і прокатки в калібрах.

Показано що прокатка на гладкій бочці має потенціал для використання в разі прокатки НЛЗ з дефектами макроструктури. Зроблено оцінку впливу основних параметрів прокатки: абсолютне обтиснення і температура на «заліковування» дефектів макроструктури.

### **Література**

1. Ботников С. А. Современный атлас дефектов непрерывнолитой заготовки и причины возникновения прорывов кристаллизующейся корочки металла.: Волгоград, 2011. 97 с.
2. Качество непрерывнолитых заготовок. Труды Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы горно-металлургического комплекса Казахстана», г. Караганда, 8–7 декабря, 2007г. / П. О. Быков, Г. М. Никитин, Р. И. Сержанов. 2007. 379 с.
3. Исследование нестационарной стадии винтовой прокатки непрерывнолитых заготовок на трехвалковом обжимном стане. Труды XVII международной научно технической конференции «ТРУБЫ – 2009». 2009г. / Ю. В. Бодров, Д. В. Овчинников, В. Л. Устьянцев, А. А. Богатов. 2009. 287 с.
4. Моделирование процесса винтовой прошивки заготовок большого диаметра в двухвалковом стане методом: Известия высших учебных заведений. Черная металлургия конечных элементов / В. П. Романенко, Д. В. Сизов., 2011. 36 с.
5. Моделирование процессов формоизменения дефектов при прокатке в калибрах. Металлургия: Технологии, управление, инновации, качество. Сборник трудов всероссийской научно практической конференции.г. Новокузнецк, 2011г. / В. Н. Кадыков, А. А. Уманский, Ю. А. Мартыанов. 2011. 45 с.

6. Использование программного комплекса DEFORM-3D при моделировании процессов сортовой прокатки: Вестник МГТУ им. Носова. / Р. И. Кинзин, С. С. Рычков. 2011. 45 с.
7. Скляр В. А., Смирнов Е. Н. Конечно-разностные методы в обработке металлов давлением. Конспект лекций для студентов специальности.: Старый Оскол, 2016. 68 с.
8. Шляпугин А. Д. Моделирование и оптимизация технологических процессов ОМД: Самара, 2010. 46 с.
9. Экспериментальное исследование динамики сгушения осевых зон непрерывного литья заготовок на физических моделях. 11-я Международная конференция по металлургии и материалам, “METAL - 2002”, Hradec nad Moravicni Czech Republic. – Ostrava: VSB – Technical University; А.А. Минаев., А.Н. Смирнов., М.В. Смирнов. 2002. 218 с.
10. Tripathy P.K., Das S. Migration of slab defects during hot rolling. *Iron making and Steelmaking*. 2006. № 4. С. 447–483.
11. Tirosh J., Shrizby A., Rubinski I.. Evolution of anisotropy in the compliances of porous materials during plastic stretching or rolling – analysis and experiments. *Mechanics of Materials*. 1999. №7. С. 449–460.

DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185106

УДК 539.2+546.06

**В.Г. Верещак**<sup>1</sup>, д.т.н., проф., vereschak@bigmir.net

**О.С. Баскевич**<sup>1</sup>, к.ф.–м.н., с.н.с., abaskevich@ukr.net

**О.О. Пасенко**<sup>1</sup>, к.т.н., доц., smfs@i.ua

**Б.П. Серета**<sup>2</sup>, д.т.н., проф., seredabp@ukr.net

<sup>1</sup>Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет", м. Дніпро

<sup>2</sup>Дніпровський державний технічний університет, г. Кам'янське

## МОДЕЛЮВАННЯ РОЗЧИННОСТІ ОКСИДІВ МЕТАЛІВ У МАТРИЦІ ДІОКСИДУ ЦИРКОНІЮ

*У даній роботі проведено моделювання утворення асоціатів «катіон домішка–вакансія» та отримано напівемпіричне рівняння, яке задовільно описує експериментальні дані розчинності оксидів металів в матриці діоксиду цирконію. На підставі чисельних розрахунків показано, що найбільшу розчинність в матриці діоксиду цирконію мають оксиди тривалентних металів: оксиди ітрію, скандію, церію та рідкісноземельних елементів. На основі цих висновків, що співпадають з літературними даними, в якості стабілізаторів високотемпературних модифікацій діоксиду цирконію для отримання високоякісних стабілізованих матеріалів рекомендується використовувати оксиди ітрію і скандію, як найбільш перспективні в технології стабілізованого  $ZrO_2$ .*

**Ключові слова:** математичне моделювання; діоксид цирконію; гетеровалентні заміщення; розчинність оксидів; стабілізовані матеріали.

*In this work the modelling of associates formation was conducted "cation of impurity–vacancy" and semiempirical equalization that satisfactorily describes experimental data of solubility of metals oxides in the matrix of zirconium dioxide is got. It is shown on the basis of numeral calculations, that most solubility in the matrix of zirconium dioxide the oxides of trivalent metals have: oxides of yttrium, scandium, cerium and rare earth elements. On the basis of these conclusions that coincide with literary data, as stabilizers of high temperature modifications of zirconium dioxide for the receipt of high-quality steady-state materials it is recommended to use the oxides of yttrium and scandium, as most perspective in technology of stabilized  $ZrO_2$ .*

**Keywords:** mathematical modeling; of zirconium dioxide; heterovalent replacement; solubility of oxides; stabilize materials.

### Постановка проблеми

Стабілізація високотемпературних модифікацій діоксиду цирконію є важливим питанням сучасного матеріалознавства. Для стабілізації діоксиду цирконію необхідно дослідити розчинність стабілізуючих домішок оксидів металів  $Me_xO_y$ . Сучасні погляди на процес стабілізації високотемпературних модифікацій діоксиду цирконію базуються на гіпотезі утворення твердих розчинів заміщення, які сприяють стійкості кубічних структур [2]. Введення донорних катіонів в ґратку  $ZrO_2$  з радіусами іонів, більшими, ніж у іона цирконію збільшує об'єм елементарної ґратки діоксиду цирконію, а це дає можливість атомам кисню зайняти позиції, характерні для кубічного, або тетрагонального діоксиду цирконію і підвищити тим самим термодинамічну стійкість даних структур при низьких температурах. Ефект стабілізації залежить від розчинності оксидів металів в матриці  $ZrO_2$  і характеру взаємодії між ними. Вивчення процесів розчинності є актуальним з точки зору розробки теоретичних критеріїв розчинності оксидів металів в ґратках  $ZrO_2$ .

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Теоретичний розрахунок характеристик розчинності оксидів металів в матриці діоксиду цирконію отримували методами термодинамічного аналізу даного процесу [2]. В роботах [2–4] розглянуто модельну систему, в якій кубічна кристалічна ґратка  $ZrO_2$  вважається базо-

вою (матрицею) і знаходиться в рівновазі з оксидом іншого металу. При тій, чи іншій дії на дану систему, вона буде прагнути до стану в якому її енергія Гіббса ( $G$ ) буде мінімальною, а хімічні потенціали компонентів в кожній із співіснуючих фаз будуть однакові [5]. Стехіометричний склад розчинного оксиду ( $Me_xO_y$ ), а також розмір іона, можуть відрізнятися від базових параметрів для ґратки  $ZrO_2$ , а це призводить до істотного перерозподілу атомів кисню навколо атома проникнення, утворенню вакансій і перерозподілу електронної густини поблизу домішки. Врахування цих ефектів можливе при введенні в рівняння Гіббса наступних видів енергії:

- додаткової енергії пружної деформації ґратки —  $U_{np}$ ;
- енергії перерозподілу електронної густини поблизу атома домішки —  $\Delta E_{el}$ ;
- енергії утворення додаткових вакансій в кисневій підґратці базової кристалічної ґратки  $ZrO_2$  —  $E_{вак}$ .

#### Формулювання мети дослідження

Мета роботи полягає в отриманні математичного рівняння в рамках моделі утворення асоціатів «катион домішка–вакансія» з урахуванням експериментальних даних, яке з першого наближенні описує розчинності оксидів металів в матриці діоксиду цирконію.

#### Виклад основного матеріалу

Зробимо припущення: число атомів  $Zr$  в базовій кристалічній ґратці фіксоване і рівне  $N_z$ , система  $ZrO_2$  знаходиться в рівновазі з оксидом металу домішки  $MeO$  а, перехід атома металу домішки в базові ґрати  $ZrO_2$  (розчинність оксиду) супроводжується утворенням додаткового елементарного осередку в базових ґратках. Якщо доля домішки  $\alpha$  не дорівнює 2, то утворюються вакансії в кисневій підґратці базової ґратки  $ZrO_2$ . Позначимо через  $N'$  — число катіонів металу домішки, які перейшли в базову ґратку  $ZrO_2$ , тобто розчинилися в ній. Термодинамічний потенціал Гіббса в загальному вигляді визначається виразом [2]

$$G = E - TS + PV, \quad (1)$$

де,  $E$  — внутрішня енергія системи, Дж/моль;  $T$  — температура, К;  $S$  — ентропія, Дж/моль;  $P$  — тиск, МПа;  $V$  — об'єм системи, моль.

Зміну внутрішньої енергії системи  $E$  при розчинності  $N'$  молекул оксиду домішки можна записати у вигляді

$$\Delta E = -N'_z W_{ym}(MeO_\alpha) + N'_z W_{ym}(ZrO_2) + N'_z \Delta E_{el} + (2 - \alpha) N'_z E_{вак} + U_{np} \cdot N'_z, \quad (2)$$

де  $N'_z W_{ym}(MeO)_\alpha$  — енергія утворення оксиду  $MeO_\alpha$  і  $ZrO_2$ ;  $E_{el}$  — енергія перерозподілу електронної густини при впровадженні атома домішки в базову ґратку;  $E_{вак}$  — енергія вакансії, що утворюється в базових ґратках;  $U_{np}$  — енергія пружної деформації базових ґраток поблизу домішки.

Множник  $(2 - \alpha)$  визначає число вакансій, що утворюються в підґратці кисню  $ZrO_2$ , при розчинності одного катіона домішки. Ентропію системи визначимо з відомого рівняння Больцмана [2]

$$S = k \ln W, \quad (3)$$

де  $k$  — постійна Больцмана;  $W$  — число можливих станів системи, що відповідають заданому значенню енергії системи.

В розбавлених розчинах можна вважати, що всі катіони домішки знаходяться в однаковому оточенні і дають однаковий внесок у внутрішню енергію системи, а отже число можливих станів системи буде дорівнювати множнику числа можливих станів підґратки Цирконію на число можливих станів підґратки кисню в базовій ґратці діоксиду цирконію:  $W = W_{Zr} \cdot W_0$ . Число станів у підґратці  $Zr$  визначиться з виразу:

$$W_Z = \frac{(N_z + N')!}{N_z! N'!}.$$

Діоксид цирконію в підґратці кисню має вдвічі більше вузлів, ніж у підґратці  $Zr$ , тому число можливих станів цієї підґратки можна записати у вигляді

$$W_0 = \frac{(2(N_z + N'))!}{(2N_z + \alpha N')!((2 - \alpha)N')!}.$$

Загальне число можливих станів системи, що складається з  $N_z$ , атомів Zr,  $N'$  атомів металу домішки  $2N_z + \alpha N'$  і атомів кисню  $(2 - \alpha)N'$  для відповідного значення енергії системи визначиться рівнянням

$$W = \frac{(N_z + N')!}{N_z!(N')!} \cdot \frac{(2(N_z + N'))!}{(2N_z + \alpha N')!((2 - \alpha)N')!}.$$

Тоді ентропію системи можна записати

$$S = k \ln \left[ \frac{(N_z + N')!}{N_z!(N')!} \cdot \frac{(2(N_z + N'))!}{(2N_z + \alpha N')!((2 - \alpha)N')!} \right]. \quad (4)$$

Підставивши (4) і (2) в (1), отримаємо вираз для енергії Гіббса

$$G = N'(W_{y_{me}}(ZrO_2) - W_{y_{me}}(MeO_\alpha)) + N'\Delta E_{el} + (2 - \alpha)N'E_{вак} + U_{np} \cdot N' - kT \cdot \ln \left[ \frac{(N_z + N')!}{N_z!(N')!} \cdot \frac{(2(N_z + N'))!}{(2N_z + \alpha N')!((2 - \alpha)N')!} \right].$$

Враховуючи те, що числа  $N_z$  і  $N'$  великі, то для логарифмів факторіалів можна скористатися формулою Стірлінга [6]. Після нескладних перетворень отримаємо остаточний вираз для енергії Гіббса

$$G = N'\Delta W + N'\Delta E_{эл} + (2 - \alpha)E_{вак}N' + N'U_{np} - KT \{ (N_z + N') \ln(N_z + N') - N_z \ln N_z - N' \ln N' + 2(N_z + N') \ln[2(N_z + N')] - (2N_z + \alpha N') \ln(2N_z + \alpha N') - (2 - \alpha)N' \ln[(2 - \alpha)N'] \}.$$

Знайдемо мінімум потенціалу враховуючи, що число атомів Zr в системі залишається постійним ( $N_z = \text{Const}$ ):

$$\frac{\partial G}{\partial N'} = \Delta W + \Delta E_{эл} + (2 - \alpha)E_{вак} + U_{np} - KT \{ \ln(N_z + N') - \ln N' + 2 \ln[2(N_z + N')] - \alpha \ln(2N_z + \alpha N') - (2 - \alpha) \ln[(2 - \alpha)N'] \} = 0.$$

Після нескладних перетворень отриманий вираз можна надати у вигляді

$$\Delta W + \Delta E_{эл} + (2 - \alpha)E_{вак} + U_{np} = KT \ln \frac{N' + N_z}{N'} \cdot \frac{(2(N' + N_z))^2}{(\alpha N' + 2N_z)^\alpha ((2 - \alpha)N')^{2 - \alpha}}. \quad (5)$$

Якщо позначити атомну частку розчинного в матриці  $ZrO_2$  металу домішки через  $\rho = N'/(N_z + N')$  і підставити цей вираз в (5), то отримаємо

$$\Delta W + \Delta E_{эл} + (2 - \alpha)E_{вак} + U_{np} = KT \ln \left[ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{(2/(2 + \alpha))^{2 - \alpha}}{(1 - (2 - \alpha)\rho/2)^\alpha \rho^{2 - \alpha}} \right]. \quad (6)$$

Рівняння (6) визначає атомну частку розчинного в матриці металу домішки, що відповідає мінімуму потенціалу Гіббса. Виконавши потенціювання виразу (6) приведемо його до зручного вигляду для подальшого дослідження

$$(2/(2 - \alpha))^{2 - \alpha} \cdot \left\{ \frac{1}{(1 - (2 - \alpha)\rho/2)^\alpha \rho^{3 - \alpha}} \right\} = \exp \frac{\Delta W + \Delta E_{эл} + (2 - \alpha)E_{вак} + U_{np}}{KT}. \quad (7)$$

Структура лівої частини рівняння (7) істотно залежить від валентності оксиду металу, що розчиняється, і залежно від значення  $\alpha$ , отримаємо різні рівняння для умов рівноважного розчинення  $MeO_\alpha$  в матриці діоксиду цирконію.

Так для оксидів лужних металів  $\alpha = 0,5$  і рівняння (7) прийме вигляд

$$\left( \frac{4}{3} \right)^{3/2} \cdot \left[ \frac{1}{(1 - 3\rho/4)^{1/2} \rho^{5/2}} \right] = \exp \frac{\Delta W + \Delta E_{эл} + 1.5E_{вак} + U_{np}}{KT}. \quad (8)$$

Для оксидів двовалентних металів типу CaO,  $\alpha = 1$ , тоді

$$2 \cdot \left[ \frac{1}{(1 - \rho/2)\rho^2} \right] = \exp \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + E_{вак} + U_{np}}{KT}. \quad (9)$$

При використанні в якості стабілізуючої добавки оксидів тривалентних металів типу  $Y_2O_3$ ,  $\alpha = 1,5$  і рівняння (7) матиме вигляд

$$2 \cdot \left\{ \frac{1}{(1 - \rho/2)^{3/2} \rho^{3/2}} \right\} = \exp \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + 0,5E_{вак} + U_{np}}{KT}. \quad (10)$$

Якщо розчинений оксид має такий же стехіометричний склад, як і базова кристалічна ґратка  $ZrO_2$ , то  $\alpha = 2$  і в підґратці кисню вакансії не утворюються. Додатковий множник  $W_0$ , який визначає число станів підґратки кисню, стає рівним одиниці і для рівняння (7) отримаємо

$$\frac{1}{\rho} = \exp \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + U_{np}}{KT}. \quad (11)$$

Діапазон робочих температур синтезу даних систем знаходиться в межах 1000—1500°C. Для цього інтервалу температур знаменник показника експоненти має значення  $1,38 \cdot 10^{-20} \sim 2 \cdot 10^{-20}$  Дж, або 0,1eВ. З іншого боку розчинення оксидів металів в матриці діоксиду цирконію в більшості випадків супроводжуються виділенням тепла, а величина експоненти, що стоїть в чисельнику показника, приймає значення порядку 1~5eВ. При цьому показник експоненти може приймати значення порядку 10—50eВ, що вказує на дуже малу розчинність даного оксиду в матриці  $ZrO_2$ . Для оцінювання розчинності оксидів розглянемо детальніше кожен додаток показника експоненти в рівнянні (11). Сильна взаємодія металів з киснем обумовлює високий ступінь іонного зв'язку в сполуках типу MeO, проте навіть у даному випадку ефективні заряди атомів, надані в електронних одиницях, не співпадають з валентністю хімічних елементів, які утворюють оксид. Це означає, що і компоненти матриці  $ZrO_2$ , і компоненти оксиду, що розчиняються, вже «складені» з відповідних іонів, а при утворенні твердих розчинів практично не змінюють своїх енергетичних характеристик, що особливо характерно для ізовалентних твердих розчинів. Ця властивість ще більше проявляє себе для ізоstrukturних сполук, оскільки навіть число найближчих сусідів навколо кожного з типів іонів виявляється незмінним. Якщо компоненти суміші не ізоstrukturні (ізоdиморфізм), то необхідно враховувати енергію поліморфних перетворень структури оксиду впровадження в структуру матриці  $ZrO_2$ .

Для гетеровалентних заміщень, які є одним з найбільш поширених типів заміщення, виникає необхідність зарядової (або валентної) компенсації, що приводить до цілої низки структурно-термодинамічних наслідків, один з яких — зміна ближнього порядку у складі суміші та утворення комплексу «атом домішки — компенсатор».

Для врахування цього явища зробимо наступні зауваження. У виразах (7—10) атомна частка металу домішки  $\rho$  в лівій частині рівнянь стоїть в знаменнику в різних ступенях, причому ступінь зростає при зменшенні валентності металу. Фізично це означає, що навіть при великому значенні показника експоненти правої частини у рівняннях (7—10) розчинність навіть оксидів лужних металів повинна бути відмінною від нуля. Це можливо за рахунок збільшення ентропійного додатка в потенціалі Гіббса за рахунок збільшення числа вакансій в кисневій підґратці матриці  $ZrO_2$ . Кількість таких вакансій повинна зростати при збільшенні різниці у валентностях атомів Zr і домішки, яка буде найбільшою у випадку, якщо метал домішки лужний.

Отримані розрахункові дані не співпадають з експериментальними [1]. Це зумовлено тим, що рівняння (8—11) отримані для випадку ідеального твердого розчину з хаотичним розподілом як атомів металу домішки, так і вакансій в матриці діоксиду цирконію без урахування взаємодій в комплексі «атом домішки — вакансія». Взаємодія в таких комплексах може істотно впливати на кількість вільних вакансій в підґратці кисню, змінюючи таким чином величину ентропійної складової в енергії Гіббса.

Ґрунтуючись на теорії точкових дефектів у кристалічних тілах [7], виникнення взаємодії між домішковими атомами і вакансіями в гетеровалентних ізоstrukturних сумішах можна пояснити таким чином.



Катіони домішки, які мають меншу валентність, ніж атом Цирконію, що заміщуються в кристалічній ґратці, є акцепторами електронів, тобто несуть негативний ефективний заряд. Аніонні вакансії є донорами електронів і несуть позитивний ефективний заряд. Оскільки дефекти з протилежними зарядами взаємно притягаються, то виникають асоціації протилежно заряджених дефектів. Енергію електростатичної взаємодії в такому асоціаті можна визначити рівнянням [2]

$$\Delta E = \frac{q_M e q_V}{4 \pi \epsilon_0 \epsilon d}, \quad (12)$$

де,  $q_M$ ,  $q_V$  — ефективний заряд металу домішки і вакансії;  $\epsilon$  — діелектрична проникність речовини матриці;  $d$  — відстань між елементами асоціату.

Зробимо оцінювання енергії утворення асоціату на прикладі розчинення  $\text{Na}_2\text{O}$  в  $\text{ZrO}_2$ . Два атоми натрію, заміщаючи два атоми цирконію в кристалічній ґратці діоксиду цирконію, утворюють в ній три вакансії. Ефективний заряд кожного іона натрію буде меншим одиниці і має величину 0,6—0,7 еВ. Іони  $\text{Zr}^{4+}$  в сполуках  $\text{ZrO}_2$  мають ефективний заряд 2,0—2,1. Отже, іон натрію нестиме негативний заряд близький до 1,4, а кисневі вакансії повинні нести позитивний заряд  $q_V = 2q_{Na}/3 = 0,93$ . При відстані між вакансією та іоном 0,5 нм і діелектричною проникністю для діоксиду цирконію  $\sim 10$ , енергія утворення асоціату буде дорівнювати 0,4 еВ.

Для оцінювання ступеня дисоціації асоціатів і породжуваних ними вакансій скористаємося розподілом Больцмана [162]

$$\chi_{disc} = \frac{N_v(\text{дис})}{N_{vo}} e^{-\frac{\Delta E}{kT}} \approx 0,03.$$

Для ( $T=1000^\circ\text{C}$ ;  $kT=0,1$  еВ). Розглянутий приклад показує, що навіть при температурі  $1000^\circ\text{C}$  велика частина вакансій пов'язана з іонами натрію, що не враховано в рівняннях (8—11). Уточнимо вираз для ентропійного чинника в рівнянні Гіббса з урахуванням ступеня дисоціації комплексу «атом домішка — вакансія». Число вільних вакансій можна визначити з рівняння:  $N_v(\text{дис}) = (2-\alpha)N'\chi$ . Тоді число вакансій, пов'язаних з іонами домішки, визначиться з виразу:  $N_{vz} = (2-\alpha)N'(1-\chi)$ , а загальне число вузлів підґратки кисню, які можуть бути зайняті вільними вакансіями, запишемо у вигляді  $2(N_z + N') - (2-\alpha)N'(1-\chi)$ . З урахуванням цього рівняння отримаємо вираз для числа станів  $W_0$  з урахуванням ступеня дисоціації комплексу «атом домішки — вакансія»

$$W_0 = \frac{[2(N_z + N') - (2-\alpha)N'(1-\chi)]!}{(2N_z + \alpha N')! ((2-\alpha)N'\chi)!},$$

а загальний вираз для ентропії системи, рівняння (3) перепишемо у вигляді

$$S = k \ln \left[ \frac{(N_z + N')!}{N_z! (N')!} \cdot \frac{[2(N_z + N') - (2-\alpha)N'(1-\chi)]!}{(2N_z + \alpha N')! ((2-\alpha)N'\chi)!} \right]. \quad (13)$$

Після нескладних перетворень в рівнянні (13), підставимо його у вираз (1) для енергії Гіббса. Виконавши процедуру мінімізації рівняння Гіббса і замінюючи  $N'$  на атомну частку металу, що розчиняється, отримаємо узагальнене рівняння, яке визначає масову частку розчиненого в матриці діоксиду цирконію металу домішки з урахуванням утворення асоціатів «атом домішки — вакансія»:

$$\left[ \frac{1}{(2-\alpha)\chi} \right]^{(2-\alpha)\chi} \cdot \frac{[1 - \rho(2-\alpha)(1-\chi)/2]^{\alpha+(2-\alpha)\chi}}{(1-(2-\alpha)\rho/2)^\alpha \rho^{1+(2-\alpha)\chi}} = \exp \left( \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + (2-\alpha)E_{вак} + U_{np}}{KT} \right). \quad (14)$$

Для оксидів лужних металів типу  $\text{Me}_2\text{O}$ , це рівняння буде

$$\left[ \frac{4}{(3\chi)} \right]^{3/2\chi} \cdot \frac{[1 - 3(1-\chi)\rho/4]^{0,5+3/2\chi}}{(1-3\rho/4)^{1/2} \rho^{1+3/2\chi}} = \exp \left( \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + 1,5E_{вак} + U_{np}}{KT} \right). \quad (15)$$

Для оксидів лужноземельних металів  $\alpha=1,0$  і рівняння (14) прийме вигляд

$$\left[ \frac{2}{\chi} \right]^\chi \cdot \frac{[1 - (1-\chi)\rho/2]^{1+\chi}}{(1-\rho/2)\rho^{1+\chi}} = \exp \left( \frac{\Delta W + \Delta E_{el} + E_{вак} + U_{np}}{KT} \right). \quad (16)$$

Для оксидів металів типу  $Me_2O_3$  рівняння (14) отримаємо у вигляді

$$[4/\chi]^{1/2\chi} \cdot \frac{[1-(1-\chi)\rho/4]^{3/2+1/2\chi}}{(1-\rho/4)^{3/2} \rho^{1+1/2\chi}} = \exp\left(\frac{\Delta W + \Delta E_{el} + 0,5E_{вак} + U_{np}}{KT}\right). \quad (17)$$

У випадку використання оксидів чотиривалентних металів ( $\alpha=2,0$ ) додаткові вакансії не утворюються і рівняння (15) набуває вигляд

$$\frac{1}{\rho} = \exp\left(\frac{\Delta W + \Delta E_{el} + U_{np}}{KT}\right). \quad (18)$$

При малому ступені дисоціації асоціатів «атом домішка — вакансія» ( $\chi > 0$ ) вирази (15—17) наближаються до співвідношення (18) і ентропійний внесок кисневої підґратки наближається до нуля.

Зробимо оцінку впливу ступеня дисоціації асоціатів «атом домішки — вакансія»: для дво- і тривалентних металів, на їх розчинність в матриці діоксиду цирконію. При розчиненні оксиду типу  $MeO$  в  $ZrO_2$  на кожен атом металу припадає одна киснева вакансія, ефективний заряд якої за величиною повинен дорівнювати ефективному негативному заряду домішкового іона металу. Навіть для лужноземельних металів ступінь іонізації зв'язку в оксиді близький до 0,5—0,6 і тому ефективний заряд іона металу буде наближатися до одиниці. Отже, іон домішка і вакансія несуть однакові за величиною, але протилежні за знаком заряди, які дорівнюють заряду електрона. Тоді енергія утворення асоціату відповідно до виразу (12) буде дорівнювати  $0,43 \cdot 10^{-19}$  Дж, або 0,28 еВ. Це приблизно в 1,3 рази менше, ніж для лужних металів. Ступінь дисоціації  $\chi$  при цьому буде дорівнювати  $\approx 0,06$ .

Оскільки, кількість вакансій, що припадають на один атом для двовалентних металів домішки, менший, проте ступінь дисоціації комплексів «атом домішка — вакансія» — вища, що повинно приводити до збільшення ентропійного внеску у вільну енергію Гіббса. У разі тривалентного атома металу домішки ступінь іонності є такою ж (0,5). При цьому ефективний заряд металу в оксиді приблизно дорівнює 1,5, а його ефективний заряд в матриці діоксиду цирконію є негативним і дорівнює 0,5. Оскільки, на два атоми домішки в цьому випадку доводиться одна вакансія, то її ефективний заряд знову буде наближатися до одиниці і тоді відповідно до (12) енергія комплексу «атом домішка — вакансія» дорівнює  $\approx 0,23 \cdot 10^{-19}$  Дж, або 0,14 еВ, а ступінь дисоціації  $\chi \approx 0,2$ . Таким чином, для оксидів тривалентних металів ступінь дисоціації комплексів «атом домішка — вакансія» в цьому випадку виявляється найбільшою і внесок ентропійної складової, пов'язаної з підґраткою кисню, у вільну енергію Гіббса буде також найбільшою.

Залежність ентропійного чинника від атомної частки домішкового металу з урахуванням зв'язаних вакансій наведена на рис. 1. Як видно, врахування утворення асоціатів «атом домішка — вакансія» принципово змінює вплив ентропійного чинника на розчинність домішок різних металів.

Розчинення в матриці  $ZrO_2$  оксидів дво- і тривалентних металів є переважним при температурі  $1000^\circ\text{C}$ . Зміна температури системи впливає на ступінь дисоціації асоціатів, наявність і кількість вільних вакансій. Це у свою чергу визначатиме поведінку кривих, наведених на рис.1.

Розглянуті вище міркування стосуються тільки ентропійної частини умови рівноваги, проте основне значення для розчинності оксидів металів має енергетична складова умови рівноваги. Вплив енергетичних складових на розчинність оксидів металів в матриці діоксиду цирконію розглянуті в роботі [8]. Так як кожен із додатків в лівій частині рівняння (14) не може бути розрахований в загальному випадку, розглянемо кожен додаток окремо, і оцінимо його основні залежності і поведінку із загальних міркувань.

Першим додатком є зміна енергій утворення оксидів системи при розчиненні домішок в матриці  $ZrO_2$ . Процес переходу молекул оксидів в матрицю  $ZrO_2$  можна розбити на декілька етапів [10]. Перший — плавлення оксиду добавки, тобто руйнування його кристалічної ґратки; другий — кристалізація молекул оксиду добавки в матриці  $ZrO_2$ . Плавлення кристалічної ґратки відбувається тоді, коли енергія теплового руху молекул стає близькою до енергії зв'язку молекул в кристалі, тому температура плавлення може бути використана для оцінювання зміни

енергії утворення оксидів. В даному випадку відбувається процес руйнування однієї кристалічної ґратки (оксид домішка) і утворення іншої (матриця  $ZrO_2$ ), тому для оцінювання  $\Delta W$  можна використовувати різницю температур плавлення оксиду домішки і матриці  $ZrO_2$ .

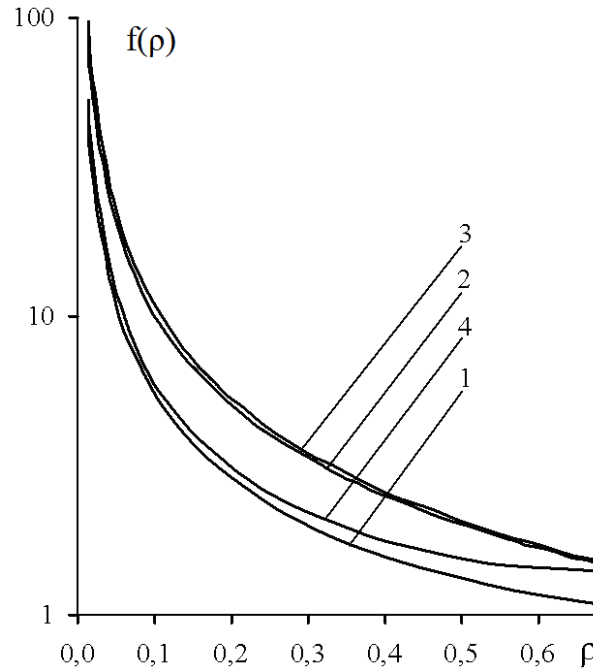


Рис. 1. Залежність ентропійного чинника від атомної частки домішки металу з урахуванням зв'язаних вакансій: 1 — лужні; 2 — двовалентні; 3 — тривалентні; 4 — чотиривалентні метали

$$\Delta W = K_t (T_{Zr} - T_{Me}). \quad (19)$$

Коефіцієнт  $K_t$  вибирається емпірично на підставі експериментальних даних про розчинність оксидів різних металів в  $ZrO_2$ . Енергія пружної напруги, що виникає в кристалі у наслідок різних розмірів іонів  $Zr(IV)$  і металу оксиду (розмірний чинник) має визначальний вплив на розчинність оксидів. Експериментальні результати і теоретичний аналіз показують, що енергія деформації викликана відмінністю в розмірах іонів матриці і домішки заміщення пропорційна квадрату відносної різниці до їх розмірів

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 \left(\frac{R_2 - R_1}{R}\right)^2, \quad (20)$$

де  $R_2$  — радіус іона заміщення.

У роботі [9] зроблена спроба розрахунку критеріїв (показників) розчинності оксидів металів в діоксиді цирконію, що базується на співвідношенні розмірів іонів заміщення та іонів матриці. Проте, просте порівняння радіусів іонів не дає однозначної відповіді на розчинність оксидів в матриці  $ZrO_2$ . Для оцінювання показників розчинності в [10] використовувалися потенціали іонізації атомів заміщення та їх іонні радіуси, що природно для іонного типу зв'язків. Проте, ступінь іонності зв'язку змінюється залежно від оточення даної сполуки і змінюватиметься при розчиненні її в діоксиді цирконію. Ступінь іонності в системі  $ZrO_2 - Me_xO_y$  задається основною сполукою і коливається в інтервалі величин 0,5—0,6. Приблизно такий же ступінь іонності характерний і для інших оксидів ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Sc_2O_3$ ,  $CeO_2$ ), за винятком оксидів лужних металів. Виходячи із загальних квантово-механічних уявлень про характер хімічного зв'язку в кристалах [11], в найбільш наочному і простому методі лінійної комбінації атомних орбіталей можна стверджувати, що хвильові функції електронів зовнішніх оболонок можуть бути побу-

довані у вигляді лінійної комбінації хвильових функцій атомів металу і атомів кисню. Співвідношення коефіцієнтів в цій лінійній комбінації і визначає ступінь іонності зв'язку. Якщо коефіцієнт при хвильових функціях кисню істотно перевищує значення коефіцієнтів при хвильових функціях атома металу, то зв'язок носить переважно іонний характер. Якщо розглядати кристал діоксиду цирконію без домішок, то для нього будуть характерні певні значення електронної густини на атомах цирконію і кисню, а також самоузгоджені потенціали електростатичного поля в кристалічній ґратці на цих же атомах. Значення самоузгодженого потенціалу на атомі цирконію буде дещо вище за потенціал іонізації  $Zr^{4+}$ , оскільки ступінь іонізації зв'язку Zr-O відмінний від одиниці, а валентні електрони цирконію деякий час проводять на іоні цирконію, тим самим зменшуючи його ефективний заряд [10], самоузгоджений потенціал і збільшуючи ефективний радіус. У разі заміщення атома цирконію іншим елементом взаємодія останнього з самоузгодженим полем кристалічної ґратки необхідно розглянути детальніше. Якщо потенціали самоузгодженого поля в кристалічній ґратці чистого оксиду домішки мають більші значення на його катіонах, ніж в матриці  $ZrO_2$ , то валентні електрони цього атома (домішки) в кристалічній ґратці  $ZrO_2$  «перетягують» на іони кисню, збільшуючи іонний характер зв'язку цього атома і, тим самим, зменшуючи його ефективний радіус. Якщо ж потенціал самоузгодженого поля в кристалічній ґратці чистого оксиду домішки має менше значення на катіонах, ніж в матриці  $ZrO_2$ , то валентні електрони такого атома в кристалічній ґратці  $ZrO_2$  повинні «перетягуватися» на цей же іон, зменшуючи іонний характер зв'язку і збільшуючи його ефективний радіус. Проте, збільшення ступеня іонності зв'язку можливе для системи з великою часткою ковалентних зв'язків між атомами. Кисневі сполуки металів вже мають достатньо високий ступінь іонності зв'язку і подальше їх збільшення відбувається із значними затратами енергії. Тому, навіть у разі великої різниці між потенціалами самоузгодженого поля чистого оксиду і матриці  $ZrO_2$ , істотної зміни ступеня іонності зв'язку і ефективних радіусів іонів не відбувається (це особливо характерно для оксидів лужних металів).

Для визначення квантово-механічних особливостей будови атомів домішок запропоновано враховувати таку їх характеристику, як електронегативність, яка великою мірою залежна від електронної конфігурації атома. Так, великі значення електронегативності вказують на те, що даний атом здатний утримувати електрони поблизу себе і віддавати їх примусово, а її малі значення свідчать про складність утворення негативних іонів. Тому вираз, який використано в роботі [9], є додатком, що враховує різницю електронегативностей елементів

$$\Delta R = \Delta R_{Me} + Le + R_{Me} \cdot \Delta \epsilon \cdot K_{\epsilon}. \quad (21)$$

При цьому необхідно прийняти до уваги, що процеси, які приводять до зміни ефективного радіуса катіона, не є однаково направленими, тобто при одній і тій же різниці електронегативностей в залежності від її знаку змінюється радіус іона. Врахуємо той факт, що змінюючи коефіцієнт  $K_{\epsilon}$  залежно від знаку заряду для остаточного оцінювання поведінки енергії виникаючої пружної напруги при розчиненні оксиду домішки в матриці  $ZrO_2$  можна використовувати вираз

$$\Delta U_{np} = K_2 \cdot \Delta R^2, \quad (22)$$

де константа  $K_2$  визначається емпірично.

Основний внесок в енергію утворення твердого розчину дає розмірний чинник елемента домішки і електронна складова цієї енергії, яка впливає на поведінку твердих розчинів, якщо атоми заміщення мають близькі розміри. Так, дослідження розчинності оксидів в  $ZrO_2$  показали, що практично не розчиняються в  $ZrO_2$  оксиди, метали яких окрім заповнених s- оболонки мають валентні електрони на р- оболонці (відзначимо, що цирконій має конфігурацію валентних електронів  $4d^2 5s^2$ ). Відмінність валентності металу оксиду, що розчиняється, і цирконію призводить до появи додаткової енергії змішування, пропорційної різниці цих валентностей  $Ez$ . Ці ефекти повинні бути враховані при виведенні кількісних емпіричних критеріїв розчинності оксидів металів один в одному. Проте, кількісне оцінювання значень величин енергій, та їх поведінки при переході від елемента до елемента можлива тільки на базі квантово-механічних розрахунків, а такий підхід не може бути використаний для емпіричного оцінювання розчинності оксидів.

У роботах [11—14] пропонується за кількісний критерій енергії змішування твердих розчинів, які обумовлені відмінністю в характері хімічного зв'язку, вибрати різниці ефективних зарядів іонів домішок і цирконію  $UE_k(Uz^*)$ . Проте, і в цьому випадку в основу подібних оцінювань можна покласти той же критерій — електронегативність атомів. Різниця в електронегативності атома домішки і атома Zr може бути використана як характеристика ступеня відмінності їх енергетичної структури, а її збільшення повинне приводити до різкого зростання  $UE_{el}$ . Для оцінювання  $UE_{el}$  пропонується наступний напівемпіричний критерій [8]

$$\Delta E_{el} = K_3 \cdot (\Delta \varepsilon)^6, \quad (23)$$

де  $K_3$  — емпірична константа.

Таким чином, комбінуючи рівняння (19–23), отримуємо критерій, який хоча і не є точною величиною зміни енергії системи «ZrO<sub>2</sub>+оксид домішка», але який ураховує загальні тенденції залежності цієї величини від властивостей елемента, що розчиняється:

$$K_p = K_t \cdot abs(T_{Zr} - T_{Me}) + K_R \cdot (\Delta R)^2 + K_{el} (\Delta \varepsilon)^6. \quad (24)$$

В цьому рівнянні для величини розрахунку  $\Delta R$  використовується співвідношення з роботи [9]

$$\Delta R = \Delta R_{Me-Zr} + K_1 \cdot R_{Me} \cdot \Delta \varepsilon + K_2 \cdot \Delta R_{Me-Zr} \cdot \ln \left( \frac{U_{Zr} \cdot R_{Me}}{U_{Me} \cdot R_{Zr}} \right), \quad (25)$$

де  $T_{Zr}$  — температура плавлення діоксиду цирконію;  $T_{Me}$  — температура плавлення оксиду домішки;  $\Delta \varepsilon$  — різниця електронегативності металу домішки і цирконію;  $R_{Me}$  — радіус іона металу домішки;  $R_{Zr}$  — радіус іона цирконію;  $R_{Me-Zr}$  — різниця радіусів іонів металу домішки і цирконію;  $U_{Zr}$  — потенціал іонізації іона цирконію;  $U_{Me}$  — потенціал іонізації іона металу домішки. Константи виразів (15) і (16) підібрані емпірично:  $K_t = 0,00067$ ;  $K_R = 75$ ;  $K_{el} = 20000$ , якщо  $\Delta \varepsilon < 0$  і  $K_{el} = 25000$ , якщо  $\Delta \varepsilon > 0$ ;  $K_1 = 0,12$ , якщо  $e < 0$  і  $K_1 = 0,35$ , якщо  $\Delta \varepsilon > 0$ ;  $K_2 = 0,09$ , якщо логарифм у виразі (15) менше нуля і  $K_2 = 1,5$  в протилежному випадку.

Результати розрахунку критерію розчинності відповідно до рівнянь (24) і (25) наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Критерій розчинності ( $K_p$ ) оксидів елементів в ґратці діоксиду цирконію

Елемент	Hf	Ce	Sc	Y	Yb	Lu	Ca	La	Mg
$K_p$	0.121	0.271	0.314	0.328	0.371	0.598	0.749	0.796	1.132
Елемент	Ti	Sr	Na	Ba	Al	Li	Be	Pb	K
$K_p$	2.827	3.676	4.261	8.24	10.66	14.7	22.3	34.08	36.48
Елемент	Rb	Mn	Cs	Sn	Si	B	Rb	-	-
$K_p$	61.6	77.4	110.3	392.3	506.4	6579	6160	-	-

Невеликі значення критерію відповідають хорошій розчинності відповідного оксиду в діоксиді цирконію ( $< \sim 1$ ), збільшення величини критерію відповідає погіршенню розчинності оксидів в матриці ZrO<sub>2</sub>.

### Висновки

Таким чином, в рамках моделі утворення асоціатів «катіон домішка–вакансія» отримано напівемпіричне рівняння, яке задовільно описує експериментальні дані розчинності оксидів металів в матриці діоксиду цирконію. На підставі чисельних розрахунків показано, що найбільшу розчинність в матриці діоксиду цирконію мають оксиди тривалентних металів: оксиди ітрію, скандію, церію та рідкісноземельних елементів. На основі цих висновків, що співпадають з літературними даними, в якості стабілізаторів високотемпературних модифікацій діоксиду цирконію для отримання високоякісних стабілізованих матеріалів рекомендується використовувати оксиди ітрію та скандію, як найбільш перспективні в технології стабілізованого ZrO<sub>2</sub>.

## Література

1. Огданский Н. Ф. Структура и механизм образования оксида никеля в потоке низкотемпературной плазмы / Н. Ф. Огданский, Л. В. Шаповалова, А. А. Семенова // Тезисы докладов IV Всесоюзного симпозиума по плазмохимии. – Днепропетровск, 1984, – Т. 2. – С. 11.
2. Румер Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – М.: Наука, 1972. – 564 с.
3. Верещак В. Г. Процессы стабилизации высокотемпературных кристаллических модификаций диоксида циркония Сообщение 1. Растворимость оксидов металлов в диоксиде циркония. Влияние энтропийного фактора / В. Г. Верещак, Н. Г. Нестеренко // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – №3. – С.149–154.
4. Верещак В. Г. Закономерности образования твердых растворов в системе  $ZrO_2-Me_xO_y$  / В. Г. Верещак, Н. Г. Нестеренко // Матеріали IV Української науково-технічної конференції “Сучасні проблеми технології неорганічних речовин”. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008. – С. 21–22.
5. Полторак О. М. Физико-химические основы неорганической химии / О. М. Полторак, Л. М. Ковба. – М.: издательство МГУ. – 1984.– 288 с.
6. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 824 с.
7. Креггер Ф. Химия несовершенных кристаллов / Креггер Ф. – М.:Мир, 1969. – 573 с.
8. Верещак В. Г. Процессы стабилизации высокотемпературных кристаллических модификаций диоксида циркония. Сообщение 2. Растворимость оксидов металлов в диоксиде циркония. Влияние упругих напряжений / В. Г. Верещак, Н. Г. Нестеренко // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 4. – С.169–171.
9. Леонов А. И. О закономерностях образования твердых растворов / А. И. Леонов // Журнал неорганической химии. – 1995. – № 6. – С. 389–394.
10. Ніколенко Н.В. Вплив поверхнево-активних речовин на дисперсність гідроксиду цирконію / М.В. Ніколенко, А.Д. Грабчук, В.Г. Верещак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – Т.4, №1. – С. 168–171.
- 11.Бокий Г. Б. Кристаллохимия / Г. Б. Бокий. – М.: Наука, 1971. – 400 с.
- 12.Урусов В. С. Теория изоморфной смесимости / В. С. Урусов. – М.: Наука, 1977. – 370 с.
- 13.Урусов В. С. Границы изовалентного изоморфизма в зависимости от различия в характере химической связи компонентов / В. С. Урусов // Геохимия. – 1970. – №1. – С. 371–378.
- 14.Гусев А. И. Физическая химия нестехиометрических тугоплавких соединений / А. И. Гусев. – М., 1991. – 286 с.
- 15.Glanz G. Polimorfismul bioxidului de zirconiu si aspecte privind stabilizaua / Glanz G., Zuda A., Goran M., Crivat D. // Studiu si ceretari fizice. – 1978. – Vol. 30, № 2. – С. 157–158.

#### MODELLING OF METAL OXIDES SOLUBILITY IN THE ZIRCONIUM DIOXIDE MATRIX

**Vereshchak V.H., Baskevych O.S., Pasenko O.O., Sereda B.P.**

Stabilizing of high temperature modifications of zirconium dioxide is the important question of modern science of materials. For stabilizing of zirconium dioxide it is necessary to know solubility of stabilizing additive of metals oxides of  $Me_xO_y$ . Stoichiometric composition of oxide ( $Me_xO_y$ ) solubility and also size of ion, can differ from base parameters for the lattice of  $ZrO_2$ , and it results in the substantial redistribution of oxygen atoms round the atom of penetration, to formation of vacancies and redistribution of electronic closeness near-by an admixture.

The strong interaction of metals with oxygen stipulates the high degree of ionic connection in connections as  $MeO$ , however even in this case the effective charges of atoms, given in electronic

units, do not coincide with valency of chemical elements that form an oxide. It means that and components of matrix of  $ZrO_2$ , and the components of oxide, that dissolve, are already "made" from corresponding ions, and at formation of solid solutions practically does not change the power descriptions, that especially characteristically for isoivalent solid solutions. This property yet more proves for isostructural compounds, as even the number of nearest neighbors round each of types of ions appears unchanging. If the components of mixture not isostructural (isodimorphism), then it is necessary to take into account energy of polymorphic transformations of structure of oxide of introduction in the structure of matrix of  $ZrO_2$ .

For heterovalent substitutions that are one of the most widespread types of replacement, there is a necessity of charge (or valency) compensation that results in quite a few structurally thermodynamic consequences, one of that is a change of near order in composition mixture and formation of complex "an atom of compensator", the value of that in this case has vacancy.

Thus, within the framework of model of formation of associates "cation an admixture is a vacancy" is got semiempirical equalization that satisfactorily describes experimental data of solubility of oxides of metals in the matrix of dioxide of zirconium. It is shown on the basis of numeral calculations, that most solubility in the matrix of dioxide of zirconium the oxides of trivalent metals have: oxides of yttrium, scandium, cerium and rarely the landed elements.

### References

- [1] Ogdanskii N. F., Shapovalova L. V. & Semenova A. A. (1984). Struktura mekhanizm obrazovaniia oksida nikelia v potoke nizkotemperaturnoi plazmy [A structure and mechanism of formation of oxide of nickel a rein the stream of low temperature plasma]. *Tezisy dokladov IV Vsesoiuznogo symposiума po plazmokhimiі – Abstracts of Paper of IV of the All-union symposium on plasmochemistry*. (Vol.2, p.11). Dnepropetrovsk [in Russian].
- [2] Rumer Yu. B. (1972). *Termodinamika, statysticheskaia fizika i kinetika [Thermodynamics, statistical physics and kinetics]*. Moskva: Nauka [in Russian].
- [3] Vereshchak V. G. & Nesterenko N. G. (2009). Protsessy stabilizatsii vysokotemperaturnykh kristallicheskikh modifikatsyi dioksida tsyrkonyia Soobshchenie 1. Rastvorimost oksidov metallov v dioksidi tsyrkonyia. Vliianie entropiinoho faktora [Processes of stabilizing of high temperature crystalline modifications of dioxide of zirconium Report 1. Solubility of oxides of metals is in dioxide of zirconium. Influence of entropy factor]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 3, 149–154 [in Russian].
- [4] Vereshchak V. G. & Nesterenko N. G. (2008). Zakonomernosti obrazovaniia tverdyykh rastvorov v sisteme  $ZrO_2-Me_xO_y$  [Conformities to law of formation of solid solution are in the system  $ZrO_2 - Me_xO_y$ ]. *Materialy IV Ukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii "Suchasni problemy tekhnologii neorhanichnykh rehovyn" – Proceedinhs of the IV Ukrainian scientific and technical conference "Modern problems of technology of inorganics"*. (pp. 21–22). Dniprodzerzhynsk: DDTU.[in Russian].
- [5] Poltorak O. M. & Kovba L. M. (1984). *Fyzyko-khymycheskye osnovy neorhanycheskoi khimii [Physical and chemical bases of inorganic chemistry]*. M.: Izdatelstvo MGU [in Russian].
- [6] Batuner L. M. & Pozyn M. E. (1971). *Matematicheskie metody v khimicheskoi tekhnike [Mathematical methods in chemicaltechnique]*. Leningrad: Khymyia [in Russian].
- [7] Kreger F. (1961). *Khymii nesovershennykh kristallov [Chemistry of Imperfect Crystals]*. Moskva: Mir [in Russian].
- [8] Vereshchak V. G. & Nesterenko N. G. (2009). Protsessy stabilizatsii vysokotemperaturnykh kristallicheskikh modifikatsii dioksida tsyrkonyia. Soobshchenie 2. Rastvorimost oksidov metallov v dioksidi tsyrkonyia. Vliianie upruhikh napriazhenii [Processes of stabilizing of high temperature crystalline modifications of dioxide of zirconium. Report 2. Solubility of oxides of metals is in dioxide of zirconium. Influence of resilient tensions]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 4, 169–171 [in Russian].
- [9] Leonov A. I. (1995). O zakonomernostiakh obrazovaniia tverdyykh rastvorov [About conformities to law of formation of solid solution]. *Zhurnal neorhganicheskoi khimii – Journal of Inorganic Chemistry*, 6, 389–394 [in Russian].

- [10]Nikolenko N.V., Hrabchuk A.D. & Vereshchak V.H. (2003). Vplyv poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn na dyspersnist hidroksydu tsyrkoniiu [Influence superficially of active substances is on dispersion of hydroxide of zirconium]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of Solid State*, 4, 1, 168–171 [in Ukrainian].
- [11]Bokyi H. B. (1971). *Krystallokhimiia [Crystal chemistry]*. Moskva: Nauka [in Russian].
- [12]Urusov V. S. (1977). *Teoryia izomorfnoi smesimosti [Theory isomorphic mixture]*. Moskva: Nauka [in Russian].
- [13]Urusov V. S. (1970). Granitsy izovalentnogo izomorfizma v zavisimosti ot razlichiiia v kharaktere khimicheskoi sviazy komponentov [Borders of isovalent isomorphism depending on distinction in character of chemical connection of components]. *Geokhimiia – Geochemistry*, 1, 371–378 [in Russian].
- [14]Gusev A. I. (1991). *Fizicheskaia khimiia nestekhiometricheskikh tugoplavkikh soedinenii [Physical chemistry of unstoichiometrical refractory connections]*. Moskva [in Russian].
- [15]Glanz G., Zuda A., Goran M. & Crivat D. (1978). Polimorfismul bioxidului de zirconiu si aspecte privind stabilizaua [Polymorphism of zirconium dioxide and stability issues]. *Studiu si ceretari de fizice – Study and physical research*, 30, 2, 157–15 [in Romanian].



DOI: 10.31319/2519-8106.2(41)2019.185249

UDC 621.9.06-52

**A. Shumeyko**, doctor of Technical Sciences, professor

**V. Korotkov**, candidate of Technical Sciences, docent

Dnipro State Technical University, Kamianske

## CREATION MODEL FOR THE CNC MACHINE OF TECHNOLOGICAL SYSTEM PLIABILITY PLIABILITG FOR THE CNC MACHINE

*The article consider using splines to develop a mathematical model of details shaping surfaces in the cutting process on CNC machines. As a result of workload simulations and obtaining data about technological system pliability, expected processing errors are determined, which can be considered at preparation stage of the control program.*

**Keywords:** *mathematical model; polar splines; system of equations; surface modeling.*

*В статті розглянутий варіант використання сплайнів для побудови математичної моделі формоутворення поверхонь деталей при обробці різанням на верстатах з ЧПК. За результатами імітації робочих навантажень і отримання даних про податливість технологічної системи визначаються очікувані похибки обробки, які можуть бути ураховані на стадії підготовки керуючої програми.*

**Ключові слова:** *математична модель; полярні сплайни; система рівнянь; моделювання поверхні.*

### Problem's Formulation

A characteristic feature of CNC machines is the performing of all the main and auxiliary movements of the working parts according to pre-prepared program on the set distance. If such movements are carried out by the form-building tool, the corresponding sizes on a detail surface turn out. Many factors prevent accurate shaping, even when accurately recording movements in the control program. For example, the elastic and thermal deformations of the CNC machine technological system elements, actually present during metalworking, and each machine has its own "individual" characteristics. As a rule, in order to establish the laws governing the formation of possible size deviations during processing, it is necessary to carry out many tests of each CNC machine, which is very difficult in the production environment.

In this regard, there is a need to create a reliable model of the behavior of the machine in a real technological process to predict the accuracy and quality of processing.

To create a mathematical model, for example, a metalworking process on CNC machines with a high degree of reliability, it is necessary to conduct a variety of tests simulating real processes, which can be carried out using special devices [1, 2]. For contour milling, the scheme of simulation actions on a forming tool, for example, an end mill, is shown in figure 1, where radiuses  $r_1, r_2, \dots$  – the deviation values of the center of the tool under the influence of simulation efforts, enclosed at an angle  $\Delta\alpha_1, \Delta\alpha_2, \dots$ . For a specific simulation effort applied to the tool at various angles, we obtain a radial diagram.

The objective of the research is to establish, with the help of a mathematical model of the flexibility of the CNC machine, the probable deviations of the tool from the programmed value in the entire range of workloads and the directions of their action. And, creation of the model is carried out according to limited experimental research for a particular machine. This approach significantly reduces the complexity of testing and allows you to analyze the processes of formation of processing errors.

The results obtained are based on a completely constructive hypothesis that, within the framework of the machine's operating modes, the processing accuracy changes continuously.

Let's pass to formalization of a task.

Let the values received at some duty of the machine be described by a curve  $r(\varphi)$ , set by points of the measurements received as a result of carrying out an experiment  $(\varphi_i, r_i)$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ), at that

$$0 = \varphi_0 < \varphi_1 < \varphi_2 \dots < \varphi_n < 2\pi$$

and

$$r_i \geq 0 \quad (i = 0, 1, \dots, n), \quad r_0 = r_n$$

and

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

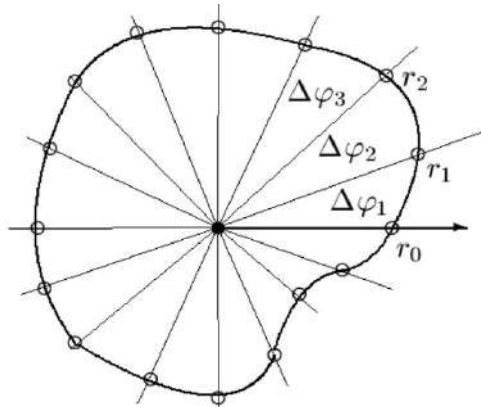


Fig. 1. Diagram of the formation of deviations of the position of the tool under the action of simulation efforts at various angles

Further we will consider a case when

$$\varphi_i = \frac{pi}{n} \quad (i = 0, 1, \dots, m2n)$$

and we assume that for all

$$i \in Z$$

$$r_i = r_i + 2n.$$

First, we introduce some notation needed later on.

### Analysis of recent research and publications

#### Splines on a uniform grid

Splines are called piecewise polynomial functions with a homogeneous structure [3, 4, 5]. The most common and historically earliest example of a spline is a broken line. Splines have a number of great features that have made them successful in a variety of applications. So, in comparison with the classical apparatus of approximation of functions, splines have better approximative properties.

Spline of minimum defect of an order  $r$  by given partition

$$\Delta h = \{ih\}_{\infty} \quad i = -\infty \dots \infty$$

called  $r - 1$  times continuously differentiable function  $s_r(t)$ , which at each interval  $(ih, (i + 1)h)$  ( $i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) is a polynomial of degree not higher  $rr$ .

Note that on the set of splines of order  $r$  ( $\geq 0$ ) there is a spline identically equal to zero and a spline identically equal to one.

From here and from the fact that the work of a polynomial of degree of  $r$  on number  $\delta$  is a polynomial of the same degree if  $\delta \neq 0$  and the identity zero for  $\delta = 0$ , as well as the fact that the sum of polynomials of degree  $n < m < r$  and  $m < rm < r$  is a polynomial of degree no higher than  $r$ , we see that the set of all splines of degree  $r$  over the partition  $\Delta h$  is a linear space.

So if  $S_r(\Delta h)$  the set of all splines of the minimal defect by partition  $\Delta h$ , and

$$y_{r,i} \in S_r(\Delta h) \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

then a linear combination of functions  $y_{r,i}$  will also lie in the set  $S_r(\Delta h)$ , i.e.

$$\sum C_i y_{r,i} \in S_r(\Delta h). \tag{1}$$

### B-splines

B-spline represents a spline with the minimum carrier for the fixed degree of a spline and an order of smoothness. The value of B-splines consists that any spline of the given degree and smoothness can be written down in the form of the linear combination of the corresponding B-splines. That is, the B-spline represents "brick" by means of which it is possible to construct a spline with the given properties [3, 4, 5]. Parabolic B-spline is as follows

$$B_{2,h}(t) = \begin{cases} 0,125 \left(3 - \frac{2t}{h}\right)^2 & (t \in [\frac{h}{2}, \frac{3h}{2}]) \\ 0,75 - 0,25 \left(\frac{2t}{h}\right)^2 & (t \in [-\frac{h}{2}, \frac{h}{2}]) \\ 0,125 \left(3 + \frac{2t}{h}\right)^2 & (t \in [-\frac{3h}{2}, -\frac{h}{2}]) \\ 0 & (|t| \geq 3h/2) \end{cases}$$

and function graph  $B_{2,h}(t)$  has the form

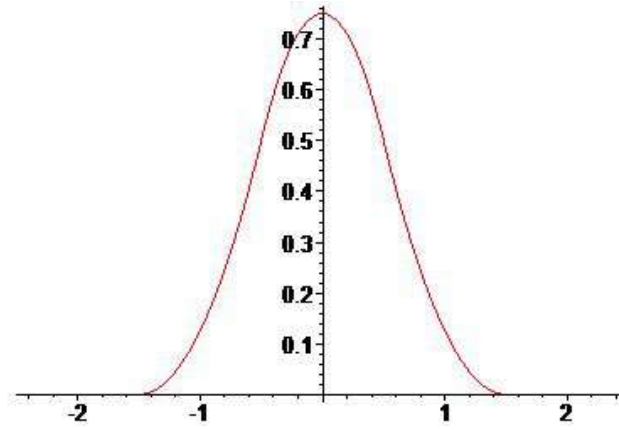


Fig. 2. View of the second-order B-spline

and, accordingly, the parabolic spline of the minimal defect in the partition  $\Delta_h$  can be written as

$$S_{2,h}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_i B_{2,h}(t - (2i - 1)h/2). \quad (2)$$

It is clear, that for any numbers  $\{c_i\}$  narrowing splines (2) per segment  $[0, T]$  (where  $T = nh$ ) there is a spline, in addition, for any particular  $t \in (ih, (i+1)h)$  representation (2) uses only three terms. This allows you to write splines (2) as

$$S_{2,h}(t) = \sum_{-\infty}^{i+1} c_i B_{2,h}(t - (2i - 1)h/2). \quad (3)$$

And for  $t \in (ih, (i+1)h)$

$$S_{2,h}(t) = \frac{c_{i+1} + 6c_i + c_{i-1}}{8} + \frac{c_{i+1} - c_{i-1}}{2h}(i - ih) + \frac{c_{i+1} - 2c_i + c_{i-1}}{2h^2}(i - ih)^2. \quad (4)$$

Let's consider the splines further called — the polar splines offered in work [5]

$$c_2(r, u) = \sum_{i=1}^{2n} \left(r_i - \frac{1}{8}\Delta^2 r_i\right) B_{2,p/n}(u - u_i). \quad (5)$$

As already noted, for each value of  $u$ , only three terms in (5) are nonzero. More precisely, if

$$u \in [(i - 0,5)p/n, (i + 0,5)p/n], \text{ то}$$

$$c_2(r, u) = \left(r_{i-1} - \frac{1}{8}\Delta^2 r_{i-1}\right) B_{2,p/n}(u - u_{i-1}) + \left(r_i - \frac{1}{8}\Delta^2 r_i\right) B_{2,p/n}(u - u_i) + \left(r_{i+1} - \frac{1}{8}\Delta^2 r_{i+1}\right) B_{2,p/n}(u - u_{i+1}).$$

Besides, in work [5], it is shown that for all whole  $i$  equalities are carried out

$$c_2(r, u_i) = r_i - \frac{1}{64}\Delta^4 r_i.$$

So splines  $c_2(r, \alpha)$  almost interpolated (accurate to  $O(\Delta^4 r_i)$ ) input data  $(\alpha_i, r_i)$  ( $i \in Z$ ). This causes many spline properties  $c_2(r, \alpha)$ . For example, if  $r(\alpha)$  - three times continuously differentiable  $2p$  - periodic function, then

$$\|r - c_2(r)\|_c \leq \frac{7}{96} \left(\frac{p}{n}\right)^3 \|r^{(3)}\|_c$$

Besides,

$$\|r' - c_2'(r)\|_c \leq \frac{1}{12} \left(\frac{p}{n}\right)^3 \|r^{(3)}\|_c$$

где  $\|f\|_c = \max_t |f(t)|$ .

Such results are called a priori or guaranteed accurate estimates for the recovery of smooth curves. They show that splines restore with high accuracy not only the smooth curves themselves, but also their derivatives. From this it is easy to derive asymptotic estimates of the errors in the reconstruction of smooth curves by polar splines.

Let the  $r(\alpha)$  there is three times a periodic function, continuously differentiable on all axis  $2p$ . Then for  $\alpha \in \left[\frac{(i-0,5)p}{n}, (i+0,5)p/n\right]$  при  $n \rightarrow \infty$  uniformly across  $\alpha$  and on  $i$  ratios are carried out

$$r(\alpha) - c_2(r, \alpha) = \frac{1}{24} \left(\frac{p}{n}\right)^3 (1 - \phi^2) \phi r^{(3)}(t) + O(n^{-4}),$$

$$r'(\alpha) - c_2'(r, \alpha) = \frac{1}{24} \left(\frac{p}{n}\right)^2 (1 - 3\phi^2) r^{(3)}(t) + O(n^{-3}),$$

where  $r = (\alpha - \alpha_i)/(p/n)$ .

Thus, using the obtained polar almost interpolation spline, it is possible to within  $O(n^{-3})$  get any intermediate value of the machine operating mode.

Our further discussion is devoted to the study of those values for which there are no experimental data.

The idea of the proposed design is as follows. We have a data set (radial diagrams) for each experiment. For each set, we construct, using the proposed method, a polar spline. A lot of polar splines are "frames", on which we pull the surface, which, in fact, represents all the possible modes of the CNC machine, lying in the framework of the experiments. To construct this surface, we will use the tensor product of second-order splines — biquadratic splines.

#### **Tensor product of spaces**

Let  $U$  - linear space of functions defined on some set  $X$  with values in the domain of real numbers and  $V$  - linear space of functions defined on some set  $Y$  with values in the space  $\mathbb{R}$ .  $\mathbb{P}$

For any functions  $u \in U$  и  $v \in V$  ratio

$$w(x, y) = u(x)v(y)$$

For all  $(x, y) \in X \times Y$  defines a function on a plane  $X \times Y$ , which is called the tensor product of functions  $u$  and  $v$  and is indicated  $u \otimes v$ .

The set of all finite linear combinations of functions on the plane  $X \times Y$  shape  $u \otimes v$  called tensor product  $U \otimes V$  and is designated  $U \otimes V$ . In this way

$$U \otimes V = \left\{ \sum_{i=1}^n c_i (u_i \otimes v_i) : c_i \in \mathbb{R}, u_i \in U, v_i \in V, i = 1, \dots, n \right\}$$

and  $U \otimes V$  is a linear space defined on a plane  $X \times Y$ .

Let  $U = P_N$  — space of algebraic polynomials of order  $N$  defined on the axis of real numbers  $X = \mathbb{R}$  и  $V = P_M$  — space of algebraic polynomials of order  $M$  on  $Y = \mathbb{R}$ . Then  $U \otimes V$  this is the linear space  $P_{N,M}$ , whose elements are polynomials of two variables, of degree not higher than  $N$  in the first variable and not higher than  $M$  in the second, whose domain is the plane  $X \times Y = \mathbb{R}^2$ .

#### **Presenting main material**

##### **Main result**

Consider the surface description by the tensor product of B-splines defined on a square lattice  $ih = (ih, jh)$ , where  $i \in Z^2$ .

The biquadratic spline of the minimal defect  $s$  with nodes at points  $(ih, jh)$  is called interpolation for functions  $f$  with bounded values  $f_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}}$  in points  $((i + 1/2)h, (j + 1/2)h)$ , if

$$f_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} - s_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} = 0.$$

Surface  $S_{r,s}(\mathbf{u})$ , described by the tensor product of B-splines has the form

$$S_{r,s}(\mathbf{P}, \mathbf{u}) = \sum_{i \in \mathbb{Z}^2} \mathbf{P}_i N_{r,s}(\mathbf{u} - \mathbf{i}/h),$$

where  $\mathbf{u} = (u, v) \in \mathbb{R}^2$  and

$$N_{r,s}(\mathbf{u} - \mathbf{i}h) \equiv B_r(u - ih)B_s(v - jh)$$

normalized tensor product of B-splines of order  $r, s$  with a lattice with nodes

$$\mathbf{i} = (i, j).$$

Consider biquadratic splines  $S_{2,2}(\mathbf{P}, \mathbf{u})$ . Function graph  $N_{2,2}(\mathbf{u})$  looks as follows

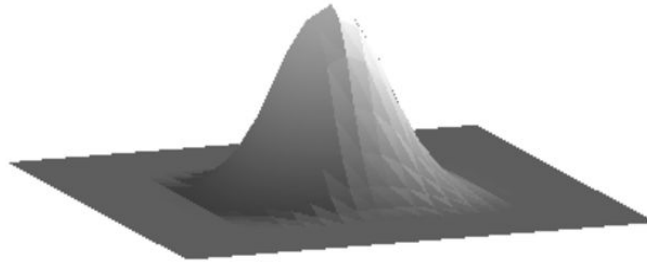


Fig. 3. View of the biquadratic spline  $S_{2,2}(\mathbf{P}, \mathbf{u})$

Using the type of parabolic B-spline, for  $\mathbf{u} \in [ih, jh] \cup [(i + 1)h, (j + 1)h]$  get

$$\begin{aligned} S_{2,2}(\mathbf{P}, \mathbf{u}) &= \sum_{i \in \mathbb{Z}^2} \mathbf{P}_i N_{2,2}(\mathbf{u} - \mathbf{i}h) = \mathbf{P}_{i,j} \frac{1 + 2\frac{u-ih}{h} - 2\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{1 + 2\frac{v-jh}{h} - 2\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \\ &+ \mathbf{P}_{i-1,j} \frac{\left(1 - \frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{1 + 2\frac{v-jh}{h} - 2\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \mathbf{P}_{i+1,j} \frac{\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{1 + 2\frac{v-jh}{h} - 2\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} \\ &+ \mathbf{P}_{i,j-1} \frac{1 + 2\frac{u-ih}{h} - 2\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \\ &+ \mathbf{P}_{i-1,j-1} \frac{\left(1 - \frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \mathbf{P}_{i+1,j-1} \frac{\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(1 - \frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \\ &+ \mathbf{P}_{i,j+1} \frac{1 + 2\frac{u-ih}{h} - 2\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \mathbf{P}_{i-1,j+1} \frac{\left(1 - \frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2} + \mathbf{P}_{i+1,j+1} \frac{\left(\frac{u-ih}{h}\right)^2}{2} \cdot \frac{\left(\frac{v-jh}{h}\right)^2}{2}. \end{aligned}$$

In matrix form, it will have the following form:

$$S_{2,2}(\mathbf{P}, \mathbf{u}) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{u-ih}{h} & \left(\frac{u-ih}{h}\right)^2 \end{bmatrix} M_{2,2} P_{2,2} M_{2,2}^T \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{v-jh}{h} \\ \left(\frac{v-jh}{h}\right)^2 \end{bmatrix},$$

where  $M_{2,2}$  — matrix size  $3 \times 3$

$$M_{2,2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -2 & 2 & 0 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}$$

and

$$P_{2,2} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{i-1,j-1} & \mathbf{P}_{i,j-1} & \mathbf{P}_{i+1,j-1} \\ \mathbf{P}_{i-1,j} & \mathbf{P}_{i,j} & \mathbf{P}_{i+1,j} \\ \mathbf{P}_{i-1,j+1} & \mathbf{P}_{i,j+1} & \mathbf{P}_{i+1,j+1} \end{bmatrix}.$$

From here we immediately get the values at the point  $\left(\left(i + \frac{1}{2}\right)h, \left(j + \frac{1}{2}\right)h\right)$ :

$$\mathbf{S}_{2,2}(\mathbf{P}, ih) = \frac{9}{16}\mathbf{P}_{i,j} + \frac{3}{32}(\mathbf{P}_{i,j+1} + \mathbf{P}_{i,j-1} + \mathbf{P}_{i+1,j} + \mathbf{P}_{i-1,j}) + \frac{1}{64}(\mathbf{P}_{i-1,j+1} + \mathbf{P}_{i-1,j-1} + \mathbf{P}_{i+1,j+1} + \mathbf{P}_{i+1,j-1}) = \mathbf{P}_{i,j} - \frac{1}{64}\Delta\mathbf{P}_{i,j}, \quad (6)$$

where

$$\Delta\mathbf{P}_{i,j} = 28\mathbf{P}_{i,j} - 6(\mathbf{P}_{i,j+1} + \mathbf{P}_{i,j} + \mathbf{P}_{i+1,j} + \mathbf{P}_{i-1,j}) - (\mathbf{P}_{i+1,j+1} + \mathbf{P}_{i+1,j-1} + \mathbf{P}_{i-1,j-1} + \mathbf{P}_{i-1,j+1}).$$

Let the surface  $f$  be given by the points

$$f_{i+1/2} = f\left(\left(i + \frac{1}{2}\right)h, \left(j + \frac{1}{2}\right)h\right), \quad (i, j = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

and

$$\mathbf{P}_i^1 = \mathbf{P}_i^1(\mathbf{f}) - f_{i+\frac{1}{2}} + \frac{1}{64}\Delta f_{i+\frac{1}{2}} = \frac{23}{16}f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} - \frac{3}{32}\left(f_{i+\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} + f_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{1}{2}} + f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\right) - \frac{1}{64}\left(f_{i-\frac{1}{2},j+\frac{3}{2}} + f_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{3}{2},j-\frac{1}{2}} + f_{i+\frac{3}{2},j+\frac{3}{2}}\right), \quad (7)$$

The corresponding spline is denoted by

$$\mathbf{S}_{2,2}^1(\mathbf{P}, \mathbf{u}) = \sum_{i \in \mathbb{Z}^2} \mathbf{P}_i^1 N_{2,2}(\mathbf{u} - ih). \quad (8)$$

when

$$\mathbf{S}_{2,2}^1\left(f, \left(i + \frac{1}{2}\right)h\right) - f_{i+\frac{1}{2}} + \frac{1}{4096}\Delta^2 f_{i+\frac{1}{2}}.$$

If the function  $f(\mathbf{u})$  has all continuous derivatives up to fourth order inclusive, then there exists a point  $\mathbf{u}_0 \in [ih, jh] \square [(i+1)h, (j+1)h]$  such that

$$\mathbf{S}_{2,2}^1\left(f, \left(i + \frac{1}{2}\right)h\right) = f_{i+\frac{1}{2}} + \frac{3}{8}h^4 \left( \frac{\partial^4 f}{\partial u^4} \Big|_{\mathbf{u}_0} + 2 \frac{\partial^4 f}{\partial u^2 \partial v^2} \Big|_{\mathbf{u}_0} + \frac{\partial^4 f}{\partial v^4} \Big|_{\mathbf{u}_0} \right). \quad (9)$$

In work [6] it is shown that if  $f(x, y) \in C^6(\mathbb{R}^2)$ , what

$$f_{i,j} - S_{i,j} = \frac{h^4}{128} \left( \frac{\partial^4 f}{\partial x^4} \Big|_{(ih,jh)} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} \Big|_{(ih,jh)} \right) + O(h^6), h \rightarrow 0. \quad (10)$$

That is, the spline  $\mathbf{S}_{2,2}^1$  asymptotically coincides with the interpolation biquadratic spline  $S$ .

We examined biquadratic splines defined on the entire plane  $\mathbb{R}^2$ . Let  $\Omega = [0, Hh] \square [0, Wh]$  rectangle with square step grid  $h$ .

Then, to obtain an interpolation biquadratic spline, it is necessary to solve a system of  $H \cdot W$  linear equations. From relations (9) и (10) it is clear, that splines  $\mathbf{S}_{2,2}^1$  asymptotically coincide with interpolation and without significant loss of accuracy, instead of interpolation splines, we can use splines  $\mathbf{S}_{2,2}^1$ .

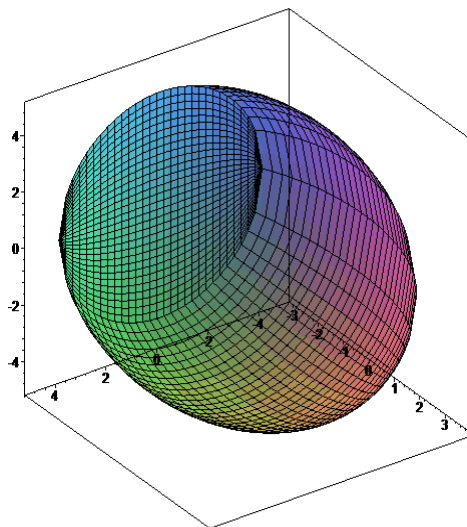


Fig. 4. Spline-surface, simulating these CNC machine operating modes

### Conclusions

Using the obtained simulation results at the stage of preparing control programs for CNC machines allows you to compare possible processing options to determine the most efficient. Modeling of processes is possible when using CAM systems using on PC with average productivity.

### References

- [1] Ustroystvo dlya opredeleniya zhestkosti stankov: A.s. 1426700 USSR, MKI<sup>4</sup> B23 B25/06 /V.S. Korotkov, V.L. Zavatskiy, V.I. Nechiporenko i dr. (USSR). – 3s.
- [2] Diagnosticheskoe ustroystvo dlya ispytaniya frezernykh stankov s programnym upravleniyem: A.s. 1328086 USSR, MKI<sup>4</sup> B23 C9/00 / V.S. Korotkov, A.V. Yakimov, N.S. Ivchenko (USSR). – 4s.
- [3] De Bor K. (1985). Prakticheskoe rukovodstvo po splaynam [Splines Practical Guide]. Moskva: Radio i svyaz [Russian language].
- [4] Korneychuk N.P. (1984). Splayni v teorii priblizheniy [splines in approximation theory]. Moskva: Nauka [Russian language].
- [5] Ligun A.A., Shumeyko A.A. (1997). Asimptoticheskie metody vosstanovleniya krivykh [Asymptotic Curve Recovery Methods]. Kyiv: Izd. Instituta matematiki NAN Ukrainy [Russian language].
- [6] Sakai M., Usmani R. (1984). Biquadratic Spline Approximations. RIMS, Kyoto Univ., 20, 431–446.
- [7] Lancaster P., Salkauskas K. (1990). Curve and Surface Fitting. An Introduction. Calgary: Academic Press.
- [8] Zaviyalov J.S., Leus V.F., Skorospelov V.F. (1985). Splainy v inzhenernoi geometrii [Splines in Engineering Geometry]. Moskva: Mashinostroenie, [Russian language].
- [9] Zaviyalov J.S., Kvasov B.I., Miroshnichenko V.L. (1985). Metody splain-funktsiy [Spline Function Methods]. Moskva: Nauka, [Russian language].
- [10] Pronikov A.S. (1985). Programnyi metod ispytaniya stankov [Software test method for machine tools]. Moskva: Mashinostroenie, [Russian language].

## ПОБУДОВА МОДЕЛІ ПОДАТЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ВЕРСТАТА З ЧПК

Шумейко А.А., Коротков В.С.

### Реферат

При виготовленні деталей на верстатах з ЧПК виникають пружні деформації технологічної системи, які впливають на точність обробки. Величина похибок, що виникають при цьому, залежить від режимів обробки і технічного стану технологічної системи верстата. Визначення можливих відхилень розмірів від дії сил різання створює можливість вносити в керуючу програму обробки корекції для компенсації похибок.

Метою роботи є створення методики розрахунку очікуваних похибок руху формоутворюючого інструменту на верстатах з ЧПК при дії сил різання у всьому діапазоні робочих навантажень.

Для досягнення поставленої мети необхідно створити математичну модель процесу формоутворення при обробці на верстатах з ЧПК, яка дозволяє отримати необхідну інформацію для точного розрахунку траєкторії руху інструментів при заданих режимах обробки.

Для здійснення прогнозу точності обробки при використанні сплайнів запропонована математична модель формування розмірів деталей при обробці різанням. За результатами імітації робочих навантажень на верстаті з ЧПК і отримання даних про податливість технологічної системи проводиться моделювання обробки з визначенням величини очікуваних похибок.

Використання отриманих результатів моделювання на етапі підготовки керуючих програм для верстатів з ЧПУ дозволяє порівнювати можливі варіанти процесу обробки і визначати більш ефективний. Моделювання процесів можливо при використанні систем автоматизованого проектування з комп'ютерами середньої продуктивності.

В умовах реального виробництва застосування розроблених методів і моделей дозволить підвищити точність обробки на верстатах з ЧПК і підвищити ефективність виробництва в цілому.

### Література

1. Устройство для определения жесткости станков: А.с. 1426700 СССР, МКИ<sup>4</sup> В23 В25/06 Заявка №4254994 30.03.1987; опубл. 30.09.1988 Бюл.№36.
2. Диагностическое устройство для испытания фрезерных станков с программным управлением: А.с. 1328086 СССР, МКИ<sup>4</sup> В23 С9/00. Заявка №4038252 18.03.1986; опубл. 07.08.1987 Бюл.№29.
3. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам / К.Де Бор . – М: Радио и связь, 1985 . – 303 с.
4. Корнейчук Н.П. Сплайны в теории приближения. - М.: Наука, 1984, 352 с.
5. Лигун А.А., Шулейко А.А. Асимптотические методы восстановления кривых. – К.: Изд. Института математики НАН Украины, 1997. – 358 с.
6. Sakai M. Biquadratic Spline Approximations / M.Sakai, R.Usmani // RIMS, Kyoto Univ. . – 1984. – №20. – С. 431–446.
7. Lancaster P. Curve and Surface Fitting. An Introduction / P.Lancaster, K.Salkauskas. – Calgary: Academic Press, 1990. – 280 p.
8. Завьялов Ю.С., Леус В.А., Скороспелов В.А. Сплайны в инженерной геометрии. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.
9. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л. Методы сплайн-функций,. М.: Наука, 1980. – 350 с.
10. Проников А.С. Программный метод испытания станков. М.: Машиностроение. 1985. – 288 с.



## Шановні автори!

Науковий журнал «Математичне моделювання» є періодичним науковим виданням, призначеним для публікації новітніх високоякісних наукових статей за наступними науковими напрямками:

**Розділ 1. Математичне моделювання в природничих науках та інформаційних технологіях.**

**Розділ 2. Моделювання та оптимізація в технології конструкційних матеріалів.**

**Розділ 3. Математичні методи в суспільних та гуманітарних науках.**

Статтю необхідно подавати набраною в редакторі MS Word.

Стаття повинна мати такі необхідні елементи (текст статті розбивається на відповідні розділи із підзаголовками, які виділяються напівжирним шрифтом):

- постановка проблеми,
- аналіз останніх досліджень та публікацій,
- формулювання мети дослідження,
- виклад основного матеріалу,
- висновки.

**Мова статті** – англійська.

**Обсяг статті** – від п'яти до десяти сторінок тексту.

**Параметри сторінки.** Формат сторінки А4, орієнтування листа – книжне. Поля: верхнє – 3,5 см; нижнє, лівє, правє – 2,5 см. Шриффт Times New Roman – 11 пт, міжрядковий інтервал – одинарний.

**Послідовність розміщення матеріалу статті:** УДК. Ініціали та прізвища авторів, науковий ступінь, звання (посада), контактний e-mail. Місце роботи, місто (у лівому верхньому кутку). Назва статті (напівжирним шрифтом великими буквами). Анотації українською та англійською мовами, ключові слова (курсивом). Текст статті в одну колонку. Список використаної літератури (не менше 15).

**Формули** набираються в редакторі формул — *Microsoft Equation*, шрифтом Times New Roman, курсивом. Прямим шрифтом набираються позначення векторів та матриць, критерії, тригонометричні функції. Параметри розміру шрифту: звичайний символ – 11 пт, крупний індекс – 9 пт, дрібний індекс – 7 пт, крупний символ – 18 пт, дрібний символ – 12 пт. Формули центрують, а ті, на які є посилання — нумеруються. Номери формул вказують у круглих дужках і вирівнюють по правому краю сторінки. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

**Таблиці, рисунки, графіки** мають бути пронумеровані та мати назву. При побудові графіків, таблиць, зображень майте на увазі, що журнал є чорно-білим.

**Список літератури (References)** оформлюється за стандартом APA.

**До статті окремими файлами додаються:**

- рецензія;
- файл із заповненою анкетною, що містить відомості про авторів;
- файл з рефератом статті українською мовою, який має складатися з назви статті, ПІП авторів, скороченої версії статті обсягом 1800-2300 знаків. Текст реферату повинен містити відомості про актуальність, мету, завдання, висновки, перспективи даного дослідження. Список літератури (References) оформлюється відповідно до ДСТУ 8302:2015.

Статті разом із супроводжувальними документами надсилати електронною поштою (**e-mail: matmod@dstu.dp.ua та seredabp@ukr.net**) у вигляді вкладених файлів або приносити особисто відповідальному секретарю за адресою: вул. Дніпробудівська, 2, корпус 5, кімната 17а.

Стаття приймається на розгляд та передається на рецензію тільки за наявності повного пакету документів, підготовлених відповідним чином, та оформлених згідно вимог до статті та супроводжувальних документів.

Редакція залишає за собою право на незначне редагування, зберігаючи при цьому головні результати та авторську стилістику.

Наукове видання

# Математичне моделювання

Науковий журнал

№ 2 (41) 2019

Технічне редагування, коректування, макетування:  
Кравець Л.Ю.

Здано до набору 28.11.2019.

Підписано до друку 28.11.2019.

Формат 60×84 1/8.

Ум.-друк. акр. 22,55. Обл. вид. арк. 12,13.

Тираж 100 прим. Замовлення № 56/19

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі ДДТУ з готового оригінал-макету. Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців серія ДК № 5399 від 26.07.2017.

Адреса редакції:

51918, Дніпропетровська обл., м. Кам'янське

вул. Дніпробудівська, 2, корпус 5, каб.17а

E-mail: [matmod@dstu.dp.ua](mailto:matmod@dstu.dp.ua)