



IZDEVNIECĪBA BALTIJA PUBLISHING

# **NEW STAGES OF DEVELOPMENT OF MODERN SCIENCE IN UKRAINE AND EU COUNTRIES**

Monograph

Riga, Latvia

2019

UDK 001(4)  
Ne930

- Title:** New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries
- Subtitle:** Monograph
- Scientific editor and project director:** Anita Jankovska
- Authors:** Bohdan Antypchuk, Valentyn Mironenko, Aslanov Jamaladdin Nuraddin, Huseynli Zenfira Seyidi, Georg Baranov, Olena Komisarenko, Andrii Ben, Ihor Palamarchuk, Andrii Ben, Anton Fedorov, Nataliia Bozhko, Vasyl Pasichnyi, Viliam Zaloga, Yuliia Denysenko, Yuliia Zelenko, Maryna Bezovska, Hanna Zinchenko, Vitaliy Dorofeyev, Igor Kovalenko, Alyona Shved, Serhii Kostyk, Vladyslav Shybetsky, Andrey Polivyanchuk, Igor Gritsuk, Elena Skuridina, Arkadii Proskurin, Yurii Halynkin, Ganna Khimicheva, Antonina Volivach, Yuliya Shtefura, Kostyantyn Shevchenko, Anatoly Zelensky, Lyubov Shchelkunova, Mariia Yemets
- Publisher:** Publishing House "Baltija Publishing", Riga, Latvia
- Available from:** <http://www.baltijapublishing.lv/index.php/all-science-3>
- Year of issue:** 2019

All rights reserved. No part of this book may be reprinted or reproduced or utilized in any form or by any electronic, mechanical, or other means, now known or hereafter invented, including photocopying and recording, or in any information storage or retrieval system, without permission in writing from the publisher and author.

New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph / edited by authors. – 3rd ed. – Riga, Latvia : "Baltija Publishing", 2019. – 348 p.

ISBN: 978-9934-588-15-0

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0>

The monograph describes the theoretical and practical aspects of the development of science in Ukraine and the EU countries. There are distinguished the general issues on the applied geometry, engineering drawing and ergonomics, electronics, radio technology and telecommunications, informatics, computer science, physical and mathematical sciences, etc. The publication is designed for scientists, lecturers, postgraduates, students, as well as a wide range of readers.

© Publishing House "Baltija Publishing", 2019  
© Authors of the articles, 2019

## Table of Contents

### CHAPTER «ENGINEERING SCIENCES»

***Bohdan Antypchuk, Valentyn Mironenko***

MODELING OF DEFINITION OF A DEPTH  
OF THE CONDENSED SOIL LAYER ULTRASOUND  
AND FORMATION OF AN ACOUSTIC SIGNAL . . . . . 1

***Aslanov Jamaladdin Nuraddin, Huseynli Zenfira Seyidi***

CALCULATION METHOD OF HERMETIC SEAL ASSEMBLY  
PARAMETERS OF THE PACKER USED DURING REPAIRING WELLS. . . . . 20

***Georg Baranov, Olena Komisarenko***

DEVELOPMENT OF INFOLOGICAL MODELING METHODS  
IN SOCIAL COMMUNICATION PROBLEMS  
FOR CREATION PERSPECTIVE COMPLETED MATERIALS. . . . . 37

***Andrii Ben, Ihor Palamarchuk***

SOLVING TASKS OF VESSEL COLLISION AVOIDANCE  
AND MANEUVERING DURING DESIGNING DECISION  
SUPPORT SYSTEMS OF THE NAVIGATOR . . . . . 58

***Andrii Ben, Anton Fedorov***

ASSESSMENT OF THE NAVIGATION SITUATION  
IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR NAVIGATOR . . . . . 78

***Nataliia Bozhko, Vasyl Pasichnyi***

DEVELOPMENT OF MEATCONTAINING PRODUCTS  
WITH A BALANCE OF FATTY ACIDS COMPOSITION. . . . . 97

***Viliam Zaloga, Yuliia Denysenko***

IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS  
OF TOOL PREPARATION AT MANUFACTURING ENGINEERING  
PRODUCTION BY THE IMPROVEMENT OF REGULATORY BASIS. . . . . 116

***Yuliia Zelenko, Maryna Bezovska***

DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY  
SCHEME FOR THE RECOVERY OF USED ENGINE OILS. . . . . 143

***Hanna Zinchenko, Vitaliy Dorofeyev***

STRESSED-DEFORMED CONDITION  
AND DESTRUCTION OF TECHNOLOGICALLY  
DAMAGED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES. . . . . 165

***Igor Kovalenko, Alyona Shved***

TECHNOLOGY FOR SYNTHESIS OF GROUP DECISIONS IN VEHICLE  
SELECTION PROBLEM FOR MULTI-MODAL TRANSPORTATION. . . . . 185

***Serhii Kostyk, Vladyslav Shybetskyy***

MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT TRANSFER PROCESS  
IN A RIBBED PIPE OF SPECIAL CONSTRUCTION. . . . . 208

***Andrey Polivyanchuk, Igor Gritsuk, Elena Skuridina***

IMPROVING THE ACCURACY OF THE GRAVIMETRIC METHOD  
FOR CONTROL PARTICULATE MATTER IN DIESEL EXHAUST. . . . . 223

***Arkadii Proskurin, Yurii Halynkin***

RESEARCH OF PROCESSES OF HYDROGEN EXTRACTION  
FROM THE GAS MIXTURE FORMED DURING  
THE HYDROGEN SULFIDE DECOMPOSITION. . . . . 244

***Ganna Khimicheva, Antonina Volivach***

ASSESSMENT OF THE LEARNING PROCESS RISKS  
AT HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN ACCORDANCE  
WITH THE DSTU ISO 31010: 2013 REQUIREMENTS. . . . . 268

***Yuliya Shtefura, Kostyantyn Shevchenko***

RADIOMETRIC METHOD FOR ASSESSING  
THE DEPTH OF THERMAL INJURIES. . . . . 290

## **CHAPTER «PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES»**

***Anatoly Zelensky***

ANALYTICAL AND PRACTICAL DEVELOPMENT  
OF VARIANT OF MATHEMATICAL THEORY OF SHELLS  
OF SMALL CURVATURE OF ARBITRARY THICKNESS. . . . . 308

***Lyubov Shchelkunova, Mariia Yemets***

NONLINEAR ARCHITECTURE AND MATHEMATICAL  
MODELING IN THE SYSTEM OF INTEGRATIVE LEARNING. . . . . 329

## CHAPTER «ENGINEERING SCIENCES»

### MODELING OF DEFINITION OF A DEPTH OF THE CONDENSED SOIL LAYER ULTRASOUND AND FORMATION OF AN ACOUSTIC SIGNAL

**Bohdan Antypchuk<sup>1</sup>**

**Valentyn Mironenko<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-48>

**Abstract.** The condensed soil layer is a serious problem for development of a root system of agricultural plants, and the harvest depends on it. At the moment there are already various densitometers of the soil, but all of them demand huge labor input and time, the accuracy of indicators of such densitometers not always answers reality because it is impossible to measure a depth of a dense layer of the soil by such device. Presently search of more progressing methods of loosening of the soil is necessary that will allow to define a depth of the compressed soil layer quickly and the operator of the farm vehicle will be able to regulate depth of processing of the soil. Use of devices which are based on interaction of ultrasonic fluctuations with the soil is more optimum at present as attenuation of sound waves in soil scanty in comparison with electromagnetic waves, especially as use of ultrasonic frequencies gives the chance to create sound bunches, which under the influence of external factors poorly disperse, considerably weakening attenuation and dispersion of a sound wave. Ultrasound – a peculiar physical basis for obtaining information in various measurements there-

---

<sup>1</sup> Graduate Student,  
National Scientific Center  
"Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture"  
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor, Main Research Associate  
of Department of Electrification and Automation of Agro-industrial Production,  
National Scientific Center  
"Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture"  
National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Ukraine

fore. Application of ultrasound concerning the soil is a little investigated in acoustics, as the soil is very difficult object for passing of ultrasound. Vegetable cover, roughnesses, existence of air pockets – all these considerably complicates passing of ultrasound in the environment concerning soils. Except already listed factors attenuation, dispersion and a divergence of ultrasound in the parties are influenced by air and wind. Also attenuation of an ultrasonic wave is influenced by mechanical and physical properties of the top layers of the soil, which are over the condensed layer. Problem of this research is to show a possibility of application of ultrasound in the course of loosening of the soil. As is well-known from laws of acoustics that the sound wave passed the elastic medium is necessary, in which there would be deformation processes. In fact such condition can will be executed unless in sandy soils but in any way not in too dense soil where both air and moisture are absent. For our research the fact that ultrasound does not pass through strongly condensed soil layer and it was put in work of the experimental automated system of loosening of the soil. In a word, the sound wave does not dissipate and does not fade, and beats off with a new force. At the same time the period from the moment of radiation and acceptance of a sound impulse is considered by the sensor taking into account power losses when passing through the top soil layers. In article features of mathematical model of passing of ultrasound for definition of a depth of the condensed soil layer are described, the acoustic behavior of the dense soil is analyzed, the comparative analysis of acoustic behavior of absolutely rigid body and the condensed soil layer is carried out.

### **1. Introduction**

Development of modern technologies of agriculture demands the advancing development and improvement of methods and technical means which will allow to take mass measurements of certain parameters of the soil (in particular – density) directly during the movement of the farm vehicle.

Soil density in many respects defines a harvest of agricultural plants. It influences growth of roots of plants. Reasons of density of the soil are different. The soil is especially subject to consolidation at the increased humidity. Heavy machinery should come around only once in the field when the humidity is higher optimum for processing as the blanket of the soil becomes excessively condensed. One more aspect of density is a den-

sity of a subarable layer, so-called accumulative or subsoil density. Under the influence of repeated passes of agricultural machinery the consolidation is observed more and more deeply. The layer, subarable condensed badly permeable for water and air, is formed.

Soil density is very difficult to control inside. It is imperceptible on the surface of the soil as the erosion or superficial consolidation are visible, for example. The analysis and the forecast of this phenomenon is closely connected with assessment of physical and mechanical properties of the soil. Thus, density both superficial, and subsoil this very harmful phenomenon which accompanies intensive agricultural production. It is very difficult to return the soil to a former state. The second aspect of a problem is loosening of the soil.

It is possible to solve this problem the soil which is correctly designated by the system of cultivation. In this regard there is also demand for various densitometers of soils. But as it was already mentioned above, those densitometers which are for this time have complex structure and trenut big labor input. Especially as they do not allow to conduct a research of all field in general but only partially. Therefore there is a need of search of new technologies for loosening of the soil.

In this regard there was an idea of application of more progressive methods on measurement of density of soils, namely an ultrasonic method. However it was necessary to consider that in the nature the interaction of ultrasound with the soil becomes complicated a set of factors. It was necessary to determine also the optimum speed of the movement of the tractor and a height of installation of the sensor and, in general, a possibility of application of ultrasound to soils in the field.

Taking into account fundamental laws of acoustics it was necessary to understand carefully acoustic behavior of the condensed soil layer and to simulate ultrasonic fluctuation with it. Then taking into account this model to calculate an acoustic path and to understand as the acoustic signal will be formed. On the basis of these theoretical researches the experimental ultrasonic device on measurement of density of the soil was made.

The device for definition of a depth of strongly dense layer of the soil works at acoustic and ultrasonic frequencies and is the pulse electronic device. Basic principle of operation of the experimental ultrasonic device is as follows: the transmitter (generator of impulses), which is placed in the block of

formation, reception and processing of signals, generates an electric impulse, the ultrasonic sensor – emitter turns it into a sound wave and sends it to the soil. The ultrasonic wave is reflected from the strongly dense layer of the soil and returns to the sensor – emitter which turning it into an electric signal. The receiver, which is placed in the block of formation, reception and processing of signals, strengthens the accepted signal and sends it to the microcontroller. The microcontroller processes the signal accepted by the sensor – converter and issues the processed information on the display of the block of indication and management in the form of the image, according to this image the driver reduces or increases depth of cultivation of the soil.

The conducted laboratory researches, and then and field showed that application of an ultrasonic method on measurement of density of the soil are quite possible. Moreover, it is also possible to determine the type of soil by the nature of reflection of sound waves as the previous researches showed. If there are air pockets, then the sound wave will not be reflected at all, and will be disseminated in the soil. Also there can be a double effect of reflection: passing through the top soil layers (with energy losses) and reducing the speed, and then with a new force is reflected from strongly dense layer. These researches are already described in scientific articles therefore [1, 5]. We would like to stop on the description of model of formation of an acoustic path and on features of ultrasonic fluctuations with the condensed soil, as this question was practically not considered in general.

## **2. Acoustic behavior of the condensed soil layer**

In all questions of acoustics it is necessary to consider both elasticity and density and inertial properties of environment or a subject. His acoustic behavior does not depend on all other properties of material or a subject [3, p. 10].

Passing of ultrasound in it depends on certain properties of material (an ultrasonic wave). Whether soils have such properties? Answering this question we will carry out the analysis of influence of mechanical structure of soils on passing of an ultrasonic wave.

To analyze a possibility of use of ultrasound for measurement of density of soils it is necessary to understand processes of distribution of ultrasound and to find out that there is a dense soil as an acoustic object.

Ultrasonic fluctuations with the soil process difficult and can not always be used ultrasonic a method to soils as the soil is very difficult object for



passing of ultrasound. And the soil has the strong absorbing properties (these properties are not always stable, they can fluctuate depending on increase or, on the contrary, reduction of an amount of water, air and salts in soils). Secondly, because of roughnesses and a vegetable cover of the soil sound bunches can disperse in the parties and to distort signals, that is there will be a diffraction phenomenon (dispersion of waves). In the third the soil is the parts which are not connected among themselves, it is amorphous structure which is not capable to transfer some frequency range. In the fourth the soil is a dispersive material and can be elastic under certain conditions.

For example, at compression of sand there are elastic waves. But at extension of a part of sand just depart from each other and elastic force does not arise. That in sand the movement of a sound wave is impossible as inertia of parts of sand which would be transferred from one volume to another. It means that in loose objects the sound wave fades. The linear ratio deformation – force arises if sand is already compressed in advance as in the sandy soil deeply, where parts are pressed to each other by the top layer of the soil.

As well as any object the soil have own ability to pass and absorb sound waves. So, for example, in sandy soils the sound fades because of loss of the energy over time, which turns into other types of energy, in particular – in thermal. Such views of soils are practically not created by the wave resistance and a wave cannot be reflected, as on its way there is no barrier which will create resistance. Absolutely other picture with the dense and very condensed soils. In very condensed soil the effect of resistance of firm particles to deformation processes is observed, and than the soil is more dense, that this resistance is stronger, that will quicker displayed a wave.

Conclusions about mechanical, deformation and other physical parameters of soils do from this with what speed there passes the sound wave. Parameter of its speed has huge value for definition of a throughput possibility of an object. If an object very dense that acoustic speed in it is too small acoustic resistance increases with increase in density of an object (acoustic impedance).

Acoustic (wave) resistance it is ability of an object to carry out acoustic energy. Acoustic resistance is defined by ability of an object to absorb, refract and reflect ultrasonic waves.

In literature there are already calculations for the wave resistance of soils (table 1). Values characteristic of the most widespread  $c$  (acoustic speeds) and  $\rho$  (density of soils) in the environment are highlighted in bold

type. From the table it is visible that with any acoustic speed with increase in density of the soil wave resistance increases.

The majority of soils, as we know, have density of 1000 to 1500 k/m<sup>3</sup>. Speed of distribution of a sound in soils changes from 85 to 180 m/s [6, p. 48-52].

In the table data of soils in the environment. Very dense layer of the soil as result of economic activity of the person has very small porosity. In it water and air practically otsustvut therefore it renders strong wave resistance. Such soil layer is absolutely rigid body (object).

In acoustics rigid call a body which is not deformed under any conditions. The distance between two points (particles) in such body does not change under any conditions. Such body does not change the form and maintains invariable distribution of weight inside. One conclusion that the body which does not give in to compression is more rigid. The ability to contract does not give the exact answer to the main question yet. As an object concerning the falling wave will behave: will pass a wave or will become a rigid barrier. In acoustics, especially when we speak about a sound, it is necessary to compare only acoustic resistance of objects (density attitude towards ability to contract). More rigid will be that object for which this relation is more.

Table 1

**Wave impedance of the soil at different values  
of its density and speed of an elastic wave [6, p. 48–52]**

c, m/s	ρ, k/m <sup>3</sup>					
	1000	1100	1200	1300	1400	1500
85	<b>85</b>	93,5	102	110,5	119	127,5
100	<b>100</b>	<b>110</b>	120	130	140	150
140	140	<b>154</b>	<b>168</b>	182	196	210
180	180	198	<b>216</b>	<b>234</b>	252	270
220	220	242	264	<b>286</b>	<b>308</b>	330
260	260	286	312	338	<b>364</b>	<b>390</b>
300	300	330	360	390	420	<b>450</b>

But it is necessary to find out: application of an ultrasonic method for control of density of soils in the field which is cultivated is effective? For this purpose we will carry out the analysis of akustichesy resistance of very condensed soil.

As we already found out very condensed soil this absolutely rigid body. In acoustics rigid bodies are not considered at all as they are not capable to pass sound energy.

But as for measurement of a depth of very dense layer of the soil, the effect of not passing of ultrasound through the soil layer which is brought down without air phases and liquid also is the basis for this research. Not dispersion and attenuation of a sound wave as, for example, in sand, and fast reflection. We consider a period from the moment of radiation of a sound impulse until its acceptance by the sensor. Also surely we take in attention power losses in a top soil as the condensed soil layer lies at a depth of 25-36 cm.

An assessment of resistance of a sound wave in technology of acoustic measurements is given in two sizes: the first is acoustic rigidity of an object. Which formula such:

$$\varrho_{A.r.} = \rho c \omega = \frac{P}{A}, \quad (1)$$

where  $\rho$  – object density,  $c$  – acoustic speed,  $\omega$  – frequency of a sound wave. This formula shows dependence of sound pressure  $P$  on amplitude of shift of parts of an object  $A$ .

The second size it is a wave (or acoustic) resistance  $R$  which evidently or generally is shown by resistance to distribution of a sound wave, and its formula such is:

$$R_A = \rho c = \frac{D}{U}, \quad (2)$$

where  $\rho$  – object density,  $c$  – acoustic speed,  $D$  – amplitude of sound pressure,  $U$  – maximum amplitude of speed of fluctuation.

Measurement of distance to very dense layer of the soil at a depth is a basis of our research. Acoustic rigidity and wave resistance of very dense layer of the soil, its ability to do not pass ultrasound and quickly to reflect a sound wave, give all grounds for carrying out a research with application of an ultrasonic method.

### **3. Modelling of ultrasonic fluctuations with the soil**

Ultrasound is a process of movement and time of existents which the sound wave has. Soil layers in which the sound extends enter interaction with energy of a sound wave and absorb a part of this energy. The most part of that energy which was absorbed by the soil will turn into heat. And a smaller part will make structural changes to acoustically carried out soil layers. Absorption of sound energy depends from the frequency of ultra-

sonic fluctuations and from acoustic conductivity of different soil layers. It is characterized by the acoustic resistance (impedance) of the top  $Z_1$  and condensed  $Z_2$  soil layers.

$$Z_1 = \rho_1 c_1; \quad Z_2 = \rho_2 c_2, \quad (3)$$

where  $\rho_1$  i  $\rho_2$  – the density of layers of the soil,  $c_1$  i  $c_1$  – acoustic speeds in them.

In acoustics it is necessary to compare impedances of objects, namely a ratio of density to ability to contract: from two objects for what this ratio is more will be more rigid. This ratio by determination of rigidity quite answers characteristic of the condensed soil layer because it is always placed on a depth. And his behavior is close to behavior of absolutely rigid body.

In modeling of definition of a depth of the condensed soil layer by an acoustic method it is taken a technique of passing of ultrasound on border of two solid bodies. But this model is developed taking into account specifics of the acoustic behavior the condensed layer and top layers of soil: their acoustic conductivity and speeds of distribution of a sound in them, their wave resistance, their coefficient of attenuation (absorption) of ultrasound different types of soils, corners of falling, of reflections and refractions of an ultrasonic wave.

The volume of absorption of an acoustic wave by soils is characterized by intensity of a sound in them. The intensity of ultrasound is amount of energy which moves for unit of time through unit of area and is perpendicular to distribution of a sound wave. If sound energy  $\bar{w}$  extends with acoustic speed  $c$ , where  $P$  – the sound pressure,  $v$  – the oscillatory speed of parts of an object,  $K$  – the module of volume compression:

$$\bar{w} = \rho \frac{v_{max}^2}{2} \times \frac{P_{max}^2}{2\rho c^2} = \frac{P_{max}^2}{2K}; \quad (4)$$

$$I = \bar{w} c = \frac{v_{max}^2}{2} \rho c = \frac{P_{max}^2}{2} \frac{1}{\rho c} = \frac{v_{max} P_{max}}{2} \quad (5)$$

The intensity of a sound is directly proportional to a square of amplitude of sound vibrations (the maximum shift of an oscillatory point from position of balance):

$$I = \frac{1}{2} \rho A^2 \omega^2 v, \quad (6)$$

where  $\omega$  – the cyclic frequency of a wave;  $v$  – the speed of a sound wave;  $\rho$  – the density of the object.

In the course of distribution of flat waves in the soil the intensity of a sound becomes less in process of a distance from a radiation source. This regularity can be written down under the law of falling off of intensity of a sound:

$$I = I_0 e^{-2\alpha x} = I_0 e^{-2\alpha' x} \quad (7)$$

$$\text{here } \alpha' = 2\alpha \quad (8)$$

where  $I_0$  – the initial intensity;  $x$  – the distance from a radiation source;  $\alpha$  – the coefficient of absorption of ultrasound by object;  $\alpha'$  – the eneotichesky coefficient of attenuation which shows at what distance from a source energy of a sound wave decreased by  $e$  times.

For determination of average density of energy, and also coefficient of absorption of ultrasound and hour coefficient of attenuation of amplitude of a wave or its energy depending on time we find by the technique stated by Shutilov [7, p. 56–60, 144–145].

For the average density of energy it is similarly had:

$$\bar{w} \cong \bar{w}_0 (1 - \alpha' c) = \bar{w}_0 - \bar{w}_0 \alpha' c, \quad (9)$$

where  $\bar{w}_0$  – the initial density of energy.

Average quantity of energy which in unit of volume absorbed environment for unit of time:

$$\bar{w}_0 - \bar{w} = \overline{\Delta w}_{\text{absorption}}. \quad (10)$$

From formula (9) we have that:

$$\overline{\Delta w}_{\text{absorption}} \cong \bar{w}_0 \alpha' c. \quad (11)$$

If according to formula (5) it is intensity of ultrasound, then power coefficient of attenuation such:

$$\alpha' = \frac{\overline{\Delta w}_{\text{absorption}}}{I_0}. \quad (12)$$

For absorption coefficient according to formula (8) respectively we have:

$$\alpha = \frac{\overline{\Delta w}_{\text{погл.}}}{2I_0}. \quad (13)$$

Such determination of coefficients  $\alpha$  and  $\alpha'$  gives the chance to calculate coefficient of absorption of ultrasound without calculation of complex wave number. Behind the law of falling off of energy of a wave with distance the power coefficient of attenuation is found on a formula:

$$\alpha' = - \frac{1}{\bar{w}_0} \frac{d\bar{w}(x)}{dx} = - \frac{1}{I_0} \frac{dI(x)}{dx}, \quad (14)$$

where  $d$  – the thickness of the top layers of the soil (the depth of strongly dense soil).

Similarly we calculate time coefficient of attenuation depending on amplitude of a wave or its energy from time, that is:

$$\delta_0 = - \frac{1}{v_{max\ 0}} \frac{dv_{\max(t)}}{dt} = - \frac{1}{2I} \frac{dI(x)}{dt}, \quad (15)$$

where the zero index belongs by the time of  $t = 0$ .

It should be noted that formulas (14) and (15) give a constant of coefficients of attenuation. Generally these coefficients can depend on distance and time.

The soil and the strongly condensed soil is the firm environment. As is well-known from fundamental laws of acoustics: on border of solid bodies the nature of a wave in difference from liquid and gases changes. In gases and liquids there can be only longitudinal waves. Wave which falls on border of two solid bodies only longitudinal or only shift (cross) which create both longitudinal and tangent shifts on border of two solid bodies. It in both solid bodies is resulted by both longitudinal and cross waves which have different speeds of distribution and therefore are reflected and refract under different corners. The difference in distribution of these waves depends on elastic characteristics which define "rigidity" of an object in relation to this type of deformations. The effective rigidity  $\varrho$  of an object is connected with the speed of distribution of a certain wave the relation:

$$\varrho = \rho c^2, \quad (16)$$

from here 
$$c = \left( \frac{\varrho}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (17)$$

$$\frac{c_{\text{cross}}}{c_{\text{longitudinal}}} = \sqrt{\frac{(1 - 2\nu_o)}{(1 + 2\nu_o)}} = 2^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2} \cong 1,4, \quad (18)$$

where  $\nu_o$  – Puasson's coefficient.

This formula (18) shows that in any environment the speed of distribution of longitudinal waves exceeds the speed of distribution of cross waves in  $\cong 1.4$ .

If the flat wave extends on border of two environments then the nature of its shift remains on this border and only the speed of its distribution changes, only the wave number will change. Its formula:

$$k_x = \frac{\omega}{c}, \quad (19)$$

The ability of ultrasound to be reflected in border of two environments is defined by their wave resistance. If that is about strongly condensed soil it is actually necessary to consider passing of ultrasound for the environment consisting of several layers. It is not about one view of the soil, and about at least two. One layer is placed at a certain depth and in it there are no air phases and liquid and the top soil will be acoustically softer always:  $Z_1 < Z_2$ . Under such condition the wave is reflected completely (fig. 1) and as in this case on border of environments there is a change of a phase of oscillatory speed and pressure does not feel a jump of a phase and a half of a wave is reflected without loss.

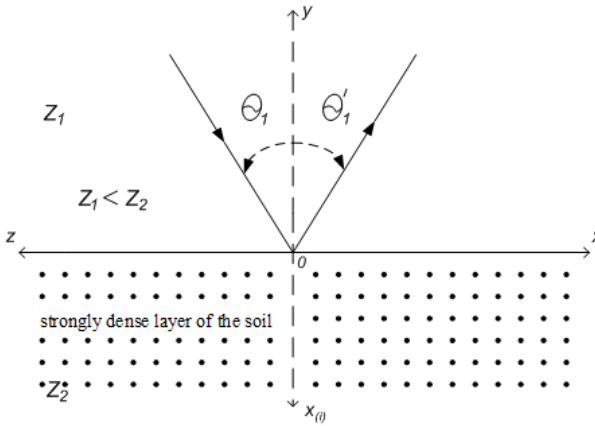
We draw a conclusion that on the border from which the wave is reflected the bunch of pressure (folding of a wave) and knot of oscillatory speed (shift) is formed. Physically it corresponds to the fact that the border of the rigid environment remains immovable, and as a result of a part in the environment which adjoins to border cannot feel shifts. It is especially important to emphasize this moment (increase in amplitude of pressure on border with a rigid barrier) for definition of a depth of the condensed soil layer with an ultrasonic method on coefficient of reflection of a wave, as receivers of ultrasound fix acoustic pressure. Such receiver will register almost doubled amplitude (pressure) of an ultrasonic wave which falls on limit of the section with the rigid environment.

Owing to this fact, the reflection coefficient on energy  $V$  of any wave at normal falling is found on a formula:

$$V_I = \left[ \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right]^2 = \left[ \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right]^2, \quad (20)$$

where  $Z_1$  and  $Z_2$  – the wave resistance of the top and lower soil layer.

If there is no strongly dense layer of the soil on the way of distribution of a sound wave, then the power coefficient of transmission  $W$  on border of two soil layers will be:



**Figure 1. Reflection of an ultrasonic wave from strongly dense layer of the soil**

*Source: author's working out*

$$W_I = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}. \quad (21)$$

These formulas of coefficients of transmission  $W_I$  and reflections  $V_I$  are valid as longitudinal and for shift (cross) waves.

On condition of full reflection of a flat wave, as in our case ( $Z_1 < Z_2$ ), the coefficient of transmission  $W_I$  turns into zero (Figure 1), and the coefficient of reflection  $V_I$  is equal to unit on condition of flatness to zero of the cosine of one of corners falling. If the cosine of the corner falling of a longitudinal wave is equal to zero then the wave extends along limit of the section. And if the the cosine of the corner falling is equal to zero then the coefficient of reflection will be equal to zero. And the corner of refraction will correspond to a critical corner of falling. At such the corner of refraction the beam disappears and all energy which was in the falling wave passes into the reflected wave.

If the second soil layer is strongly condensed, that the formula of coefficient of reflection will be:

$$V_I = \left( \frac{Z_1 \cos \sim_2 - Z_2 \cos \sim_1}{Z_1 \cos \sim_2 + Z_2 \cos \sim_1} \right)^2 \quad (22)$$



If on limit of the section of environments the shift wave falls, then such wave does not create others a shift components on border. Such wave is reflected and refracts in the form of two purely shift waves. And this formula (22) is suitable for calculation of coefficient of reflection of such wave too.

#### **4. Acoustic path and formation of echo signals**

Assessment of physical and mechanical properties of layers of the soil is a main objective of acoustic control in work of the studied system of expeditious definition of a depth of the condensed soil layer. We applied active, more widespread, universal acoustic method to this purpose, namely – an echo method [2, p. 12–15].

Time of receipt of an impulse is the informative parameter of such method that characterizes a depth of strongly condensed soil layer. At this method the measurement mode pulse, a way of obtaining information – piezoelectric.

For exact measurement of a depth of the condensed soil layer have to such conditions will be satisfied:

$$1. \quad l_t + l_r = 2 H \operatorname{tg} \varphi_t \quad [4, \text{p. 118}], \quad (23)$$

where  $l_t$  and  $l_r$  – the distance of passing of an impulse from the sensor to the condensed soil layer and back to the sensor,  $H$  – the distance from the sensor – converter to the condensed soil layer,  $\varphi_t$  – the corner of falling a beam.

$$2. \quad t = \frac{2H_{\max}}{c} \quad [3, \text{p. 35}], \quad (24)$$

where  $t$  – the time of passing of an impulse to a dense layer and back,  $H_{\max}$  – the maximum depth of sounding,  $c$  – the acoustic speed in the top layer of the soil.

$$3. \quad F = \frac{1}{T} = \frac{c}{N 2 H_{\max}} \quad [4, \text{p. 33}], \quad (25)$$

where  $F$  – the maximum frequency of receipt of the sounding impulses,  $T$  – the period of the sounding impulse,  $H_{\max}$  – the maximum depth of sounding,  $N$  – the quantity of ultrasonic impulses.

4. The period of passing of impulses is formed in such a way that before receiving the signal reflected from depth the repeated radiation does not occur. Formula of the period of the probing impulse is as follows:

$$T = \frac{2H_{\max}}{t} \quad [3, \text{p. 36}], \quad (26)$$

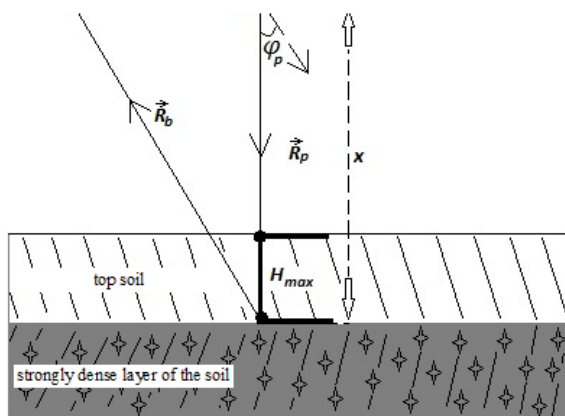
where  $T$  – the period of sounding impulse,  $H_{max}$  – the maximum depth of sounding,  $t$  – the time of passing of an impulse to a dense layer and back.

Let's consider the scheme of sounding of the soil with existence of strongly condensed layer (Figure 2). In this case the direct converter with the connected scheme serves as both the receiver and the emitter. This converter is at the same time connected to the generator and the amplifier of the device and serves both for radiation and for reception of ultrasound.

Taking into account that the condensed soil does not pass ultrasound and under any conditions is placed perpendicularly to the front of the falling waves, that such waves are flat. Then the waves reflected from the dense soil and accepted by the sensor are also the front of flat waves.

At the mathematical description of an acoustic path by definition of a depth of strongly condensed soil layer it is necessary to consider that it is absolutely sharp border (the absolutely rigid object). Acoustic characteristics of such environment are stable, their deviations with in a zone of sounding are absolutely small.

We will take a signal of radiation and reception of ultrasound for material points, which are placed in focus of the field of radiation and reception of a signal by the sensor – converter. In the drawing 1 point of P designates



**Figure 2. The scheme of a prozvuchivaniye of the condensed soil layer**

*Source: author's working out*

the center of flat waves which are radiated by the sensor and the point B is a midfield of reception of a signal the sensor.

The ultrasonic sensor – converter forms the acoustic field in soil layers by signal which arrived from point P which at the maximum depth of sounding is characterized by the chart of the direction  $j_p(x_p)$ . This function distributes amplitude of waves in the direction of a signal of radiation. Similar to a signal which accepted the sensor (point B) has the chart of the direction  $j_b(x_b)$  which characterizes sensitivity of the sensor to signals which arrive.

As strongly condensed soil layer lies at a certain depth and is not the top layer that amplitude of sound waves the sensor passes distance  $x$  to the condensed soil layer from a signal which was radiated in point P. Amplitude of the radiated signal depends on the chart of the emitter of the direction  $j_p(x_p)$  and on distance  $x$ .

The amplitude falling waves is equal:  $\frac{j_p(x_p)}{|R_p|}$ .

The amplitude of the reflected waves is equal:  $\frac{j_b(x_b)}{|R_b|}$ .

The acoustic path is a way of an ultrasonic signal from the emitter to border which reflects ultrasound, and back to the emitter. To calculate an acoustic path – it means to determine amplitude of a useful signal depending on a depth of strongly condensed soil layer, from acoustic behavior of the top layer of the soil and frequency of fluctuations. The amplitude of reflection of a wave depends from that on how many the soil is strongly condensed: the soil is more dense, the wave will be reflected stronger.

When the same converter works for the radiation and acceptance of a signal, pressure on the converter will be:

$$P = \frac{K}{S} P_o j^2(x) [4, \text{p. 115}], \quad (27)$$

where  $P_o$  i  $P$  – the amplitude of the signals which the converter radiated and accepted,  $S$  – an area of the converter,  $K$  – the reflection coefficient from the condensed soil layer,  $j(x)$  – the function describing spatial distribution of the field of radiation.

The divergence of beams is excluded for flat waves. Weakening of such waves is caused by attenuation in the environment. The coefficient of reflection  $K$  has uneven frequency characteristic. In case of limit of the section

of two environments it changes with a frequency or from a long wave of radiation. But in our case, when absolutely rigid body is the reflecting environment, it is possible not to consider frequency properties and to use some simplification:

$$K = \alpha \cdot H_{max}, \quad (28)$$

where  $\alpha$  – the coefficient of attenuation in the top layers of the soil,  $H_{max}$  – the maximum depth of sounding (the depth of strongly condensed soil layer).

With the maximum depth of sounding the function monotonously decreases behind the law:

$$j(x) = \frac{S}{lx} \quad [4, \text{p. 115}], \quad (29)$$

where  $l$  – wavelength,  $x$  – the distance from the sensor – converter to strongly condensed soil layer,  $S$  – an area of the converter.

Therefore, the pressure on the receiver on the maximum depth of sounding will be:

$$\left| \frac{P}{P_o} \right| = \frac{\alpha H_{max}}{S} j^2(x) = \frac{\alpha H_{max}}{S} \times \frac{S^2}{l^2 x^2} = \frac{\alpha H_{max} S}{l^2 x^2} \quad [4, \text{p. 116}]. \quad (30)$$

The relation of the maximum depth of sounding to a square of wavelength characterizes the reflecting properties of the condensed layer (the coefficient  $A_\sigma$ ):

$$A_\sigma = \frac{H_{max}}{l^2} \quad [4, \text{p. 116}]. \quad (31)$$

And so, through coefficient we will write down a formula an echo – signal which arrives to the sensor with the connected scheme:

$$\left| \frac{P}{P_o} \right| = |j^2| A_\sigma \frac{l^2}{S} \quad [4, \text{p. 116}]. \quad (32)$$

The echo signal received in in the form of temporary dependence is as a rule. It is inconvenient for definition of a depth of the condensed soil layer, therefore we will carry out transition from time to length of a run of waves scaling on acoustic speed:

$$c : l = c \cdot t.$$

Formulas (30) and (32) establish connection of a subject to control (the condensed soil layer) with an echo – signals which arrive to the sensor receiver. The information on subject to control is encrypted in an echo – signals thus:

1. The function  $j(x)$  is modelled by reflection coefficient (31), and the scheme of sounding perceiv subject to control  $O_c$  as function of a look:  $O_c = j(x) \cdot K$ ;

2. Subject to control  $O_c$  is modelled by keenness of the scheme of sounding and integrated by wave run length  $l$ ;

3. Function of distribution of the reflecting surfaces gives in to turning with function of a response at the maximum depth of sounding and distribution of echo – signals is formed.

### 5. Conclusions

It turns out that the question ultrasonic fluctuations with the soil was not considered in geolocation earlier. Was considered that it is impossible to probe the soil deeply. But considering that strongly dense soil lies at most at a depth of 36 cm (depth small) and we do not need to define what subject it is placed underground. And are interested for we only such qualities as: the subject density, its ability to contract, that is deformation processes in it.

Having studied acoustic behavior of strongly dense layer of the soil, came to a conclusion that it behavior it is absolutely close to behavior of absolutely rigid body. But all problem is in that, what absolutely rigid bodies do not consider in acoustics at all, as in them deformation processes are impossible.

Taking this fact in attention, considering that the soil the layered environment, we decided to be the basis for our researches, at first sight – paradoxical situation: the ultrasonic wave will never pass through absolutely rigid body.

Theoretically we understood that the ultrasonic wave surely must to be reflected from a dense layer of the soil. It was necessary to simulate interaction of ultrasound with the layered environment where the lower layer is strongly condensed. It was necessary to understand: as the acoustic signal will be formed in this case. Having considered all these nuances, having considered all these nuances, considering that works on cultivation of the soil are carried out in the environment, taking into account the strong absorbing properties of soils, it was necessary to develop the special ultrasonic sensor, as the traditional sensor (as, for example, for the sonic depth finder) here is not suitable.

But it will not be possible to disperse in the solution of this question especially. Because if the soil has a dense vegetable covering, then level

distribution of a sound can decrease in addition on 5–6 dB. The temperature of the soil or air gives the prize or loss to 5 decibels concerning attenuation or dispersion of a sound wave. But most of all renders wind and air on passing of a sound wave: acoustic speed develops with a wind speed. The wind can increase or reduce attenuation of a sound on the route of passing to the soil. The wind can increase sound level to 5 dB and also to lead to additional attenuation in 20 dB. If the sound wave moves in the direction of wind, then its speed increases (there is a concentration of sound energy) and if moves against wind – that decreases (the phenomenon of an "acoustical shadow" is observed).

It was necessary to minimize contact of the sensor with air. Completely it will not be possible to avoid this contact. Therefore it is necessary to reduce distance from the sensor to the soil. For this purpose both laboratory and field researches were conducted. Specially created models of soils were an object of researches in laboratory. In these models of soils at different depths the condensed material (wooden boards) was placed. The analysis of the received results of researches showed: if increases a depth of the condensed soil layer that the measurement error increases (for depth 0,25 m – from 4 to 14%, for depth 0,5 m – from 6 to 16%). The most exact measurements were reached at installation of the sensor at the height of 20 cm (the error made 4–6%), and with increase in height of installation of the sensor the error increased. Increase in contact of the sensor with air distorts measurements.

Similar results showed also field researches. Also it was established that within the speed of the tractor from 8 to 12 km/h systematic changes of measurements of a depth of strongly dense layer of the soil are not established. Indicators of measurements of our device differed from indicators of the hardness gage of Revyakin from -9,4 to +16%. Summing up the results, it is possible to claim surely that application of ultrasound for loosening of the soil with a height of sensor at no more than 20 cm and and at a tractor speed from 8 to 12 km/h.

### **References:**

1. Antypchuk B.O. (2017). Ultrazvukovy aksperymentalny prystry – osnovny element avtomatyzovanoi systemy upravlinnya polozhennyam gruntoro zpushuvacha [Ultrasonic experimental device – basic element of the automated system on control of the soil ripper]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya*

*silskogospodarskyh mashyn: zagalnoderzhavny mizhvidomchy naukovo-tehnichnyy zbirnyk* [Designing, production and operation of farm vehicles: nation-wide scientific and technical collection]. Kropyvnitsky: Centralnoukrainsky national technical university. Vol. 47, part 1, pp. 47–52.

2. Zatsepin A.F. (2016). *Akustichesky kontrol* [Acoustic control]. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University. (in Russian)

3. Isakovich M.A. (1973). *Obshchaya akustika* [General acoustics]. Moscow: Science. (in Russian)

4. Kapranov B.I., Korotkov M.M. (2008). *Akusticheskie metody kontrolya i diagnostiki* [Acoustic methods of control and diagnostics]. Tomsk: Publishing house of the Tomsk Polytechnic University. Part 1. (in Russian)

5. Mironenko V.G., Antypchuk B.O. (2018). Doslidzhennya prystroyu operatyvnogo vyznachennya glybyny zalyagannya ushchilnenogo sharu gruntu [The research of device on expeditious definition of a depth of strongly dense soil]. *Mehanizatsiya ta elektryfikatsiya silskogo gospodarstva : zagalnoderzhavnyy zbirnyk* [Mechanization and elektrifmkation of agriculture: nation-wide collection]. Glevakha: Institute of Mechanization and Electrification of agriculture. Vol. 8(107), pp. 12–18.

6. Netsvetov S.V. (2010). Skorost zvuka i nodul uprugosti pochvy: izmerenie i rol peredachi vibratsiy dereva na pochvu [Acoustic speed and module of elasticity of the soil: measurement and role of transfer of vibrations of a tree on the soil]. *Gruntoznastvo* [Soil science]. Donetsk: Botanical garden. Vol. 2, pp. 48–52.

7. Shutilov V.A. (1980). *Osnovy fiziki ultrazvuka* [Fundamentals of physics of ultrasound]. Leningrad: Publishing house of the Leningrad University. (in Russian)

**CALCULATION METHOD OF HERMETIC SEAL  
ASSEMBLY PARAMETERS OF THE PACKER  
USED DURING REPAIRING WELLS**

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ  
УПЛОТНИТЕЛЬНОГО УЗЛА ПАКЕРА**

**Aslanov Jamaladdin Nuraddin<sup>1</sup>  
Huseynli Zenfira Seyidi<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-49>

**Abstract.** Increasing the service life of exploitation packers used in oil and gas production by increasing the wear resistance and stability on deformation of its sealing collar is one of the most urgent tasks. From this point of view, the monograph examines the stress-strain state of packer seals. In the research work, different directions of the stress-strain of packer seals were studied. The main of these directions is the research of the deformation state of packer seals based on potential energy functionalities. Besides, the research of the initial deformation on the sealing effect at the time of its landing is one of the problems raised in the research. In the article question the factor determining the sealing ability of the seal downhole packers has been studied. It has been established that 30-40% of failed jobs associated with ventilated packer. It is also shown that the sealing ability packer seals the equipment determined by a complex mechanical and technological factors. These factors caused the value of internal and contact stresses encountered when using the seal, the size and speed of movement, purity compactibility surface. It was found that the seal provided by the compression deformation of rubber packer elements. The degree of deformation of the sealing member should be sufficient to keep the sealing elements of the installation site of the hood, landing under the action of pressure medium compacted. To determine the initial contact stress created during the defor-

---

<sup>1</sup> PhD, Associate Professor, Department «Oil-gas equipment»,  
Azerbaijan State Oil and Industry University, Azerbaijan

<sup>2</sup> PhD, Associate, Department «Oil-gas equipment»,  
Azerbaijan State Oil and Industry University, Azerbaijan



mation of the sealing element found the form factor of the seal. Also take into account the effective area of the seal. The analytical expressions for the friction force on the surface contact sealing element and the pressure causes a complete displacement of the seal where the seal is withdrawn from the installation site. Defined the expression of the pressure conditions of stability and seal contact pressure with the long-term operation of the packers (seal assembly) in a given temperature range. The article considers method of calculating the parameters of sealing of the seal assembly of the packer used during the repair of wells. For this purpose using direct variational Ritz methods determined the total potential energy of the packer seal, minimizing the potential energy of the sealing element under the terms of the Euler. Defined variational constant and the parameters of the seal packer.

### 1. Вступление

Увеличение срока работоспособности применяемых при добыче нефти и газа эксплуатационных пакеров, за счет повышения износостойкости и устойчивости на деформацию его уплотнительных манжет является одной из самых актуальных задач. С этой точки зрения в монографии исследуется напряженно-деформированное состояние уплотнителей пакера.

В исследовательской работе изучены разные направления напряженной деформации уплотнителей пакера. Основным из этих направлений является исследования деформационной состоянии уплотнителей пакера на основе потенциальных энергетических функционалов.

Кроме того, изучение влияния начальной деформации на уплотнительный эффект в момент его посадки является одной из задач, поднятых в исследовании.

В исследовательской работе рассмотрена методика расчета параметров герметизации уплотнительного узла пакеров. С этой целью используя прямые вариационные методы Ритца изыскано полная потенциальная энергия уплотнителя пакера, минимизирую потенциальной энергии уплотнительного элемента по условиям Эйлера. Определены вариационный постоянный и параметры уплотнителя пакера.

Установлено, что герметизация обеспечивается за счет деформации сжатия резиновых элементов пакера. Степень деформации уплотнительного элемента должна быть достаточной, чтобы удержать уплотнитель-

ные элементы от вытяжки из места установки-посадки при действии на него давления герметизируемой среды. Для определения начального контактного напряжения, созданного при деформации уплотнительного элемента найдено коэффициент формы уплотнителя. Также учтена эффективная площадь уплотнения. Получена аналитическая выражения, сила трения на поверхности контакта уплотнительного элемента и значение давления вызывающего полное перемещение уплотнения при котором уплотнитель не вытягивается из места установки.

## **2. На основе потенциальной энергии изучения расчетной деформации**

Пакерующий узел один из наименее надежных в работе узлов пакерного оборудования. Решающее значение для обеспечения герметичности пакеровки имеет правильный выбор параметров скважины: точного определения фактического диаметра скважины, место установки пакера и оптимального перепада давления на пакер, оптимальные формы и размеры (также осевые деформации) уплотнителя пакера [8].

Анализ промысловых данных работ по пакеровке скважин показывает, что примерно 30-40% неудачных работ связано с негерметичностью пакеровки [5].

Теоретическими и многочисленными стендовыми исследованиями установлено, что герметизирующая способность уплотнений пакерного оборудования определяется комплексом физико-механических и технологических факторов [9].

К физико-механическим факторам принято относить физико-механические характеристики материала уплотнений. Технологически-напряженное состояние уплотнения характеризуется величиной внутренних и контактных напряжений, возникающих при работе уплотнения, величины и скорости перемещения, чистоты уплотняемой поверхности. В этой связи необходимо отметить, что герметизирующие элементы работают в осложненных условиях, обусловленных высокими гидравлическими давлениями – до 100 МПа, агрессивностью рабочей среды и высокими температурами (порядка 200<sup>0</sup> и выше). В большинстве случаев герметизирующие элементы подвержены одновременному воздействию перечисленных факторов, что отрицательно сказывается на их работоспособности (рис. 3). Нарушение герметичности

сопровождается значительными размывами уплотняемых поверхностей, что в ряде случаев приводит к полному их разрушению и невозможности их ремонта и дальнейшего использования [5]. Все это свидетельствует о том, что обеспечение герметичности является одним из основных факторов нормальной работы оборудования в целом. Герметизирующим элементом пакера являются его уплотнительные резиновые элементы. Герметизация обеспечивается за счет деформации сжатия резиновых элементов пакера в осевом направлении, при установке посадки его во внутренней поверхности эксплуатационной колонны.

При расчете уплотнений из несжимаемого резинового материала широко используют прямые методы. Очень плодотворным оказывается применение метода Ритца:

$$\int_{\Omega} u_i p_i d\Omega = \Delta \cdot \int_{\Omega} P_i d\Omega = -\Delta P = -\Delta Q \quad (1)$$

где  $P = Q$  – осевые усилия приложенные к уплотнителю;  $\Delta$  – осевое перемещение деформации уплотнителя пакера;  $U_i$  – радиальное перемещение;  $P_i = P = Q$  – осевое усилия;  $d\Omega$  – элементарный площадь поверхности уплотнителя.

Функционал полный потенциальной энергии уплотнителя определяется по следующим выражением [1]:

$$P = G \int_V (\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z^2 + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2) dV - \Delta Q \quad (2)$$

Выразив  $\Delta$  из условия  $W = -\Delta W = -\Delta$  при  $z = h + (r - R_2) \tan \beta$  и исключив при помощи условия несжимаемости деформации  $\varepsilon_r$ , подсчитаем полную энергию  $P$ :

$$P = 2\pi G \int_{R_{вн}}^{R_{H}} \int_{(r-R_1)\tan\beta}^{h+(r-R_1)\tan\beta} (\varepsilon_z^2 + \varepsilon_\theta^2 + \varepsilon_z \varepsilon_\theta + \frac{1}{2} \gamma_{rz}^2) \cdot r \cdot dr dz - \Delta Q \quad (3)$$

где  $\varepsilon_r = -(\varepsilon_\theta + \varepsilon_z)$   $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$  и  $\varepsilon_z$  соответственно относительно радиальная, потенциальная и осевая деформация уплотнителя;  $\gamma_{r,z}$  – угловые деформации уплотнителя;  $G$  – модуль сдвига;  $\Delta$  – осевая деформация уплотнителя в точке приложения;  $dV$  – элементарный объем уплотнителя;  $R_{вн}, R_H$  – соответственно внутренние и наружные радиусы уплотнителя;  $W, z$  – соответственные перемещение в направлении оси  $z$ .

Для деформации уплотнителя пакера в осевом направлении примем

$$W = a_k \left(1 - \frac{Z^2}{h^2}\right) \quad (4)$$

где  $a_k$  – постоянная, подлежащая определению.

Напишем условие несжимаемости

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\theta + \varepsilon_z = 0 \quad (5)$$

Из (4) с учетом (5) имеем:

$$\frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{4}{Z} - a_k \frac{Z}{h^2} = 0 \quad (6)$$

Интегрируя (6) с учетом граничного условия

$$U = 0 \text{ при } r = R_{\text{вн.рез}} \quad (7)$$

получим

$$U = \frac{a_k \cdot Z}{h^2} \cdot \left(r - \frac{R_{\text{вн.рез}}^2}{\kappa}\right) \quad (8)$$

где  $r$  – координат в радиальном направлении.

На первом этапе сжатия уплотнителя пакера происходит первое соприкосновение его наружной поверхности с внутренней поверхностью стенки эксплуатационной колонны. При этом необходимая осевая нагрузка может быть определена методом Ритца по выражению (3) с учетом, что  $Q = Q_1$ ,  $\Delta = \Delta_1$  т.е.  $Q$ -осевая необходимая для первого. Из условия первого соприкосновения и уравнения (8) с учетом: при  $r = R_k$ ,  $z = h$  тогда  $u = \delta$  где  $\delta = R_k - R_{\text{вн.рез}}$  – зазор между наружной поверхностью (которой резина достигает внутренней поверхности колонны) уплотнительного элемента и внутренней стенкой эксплуатационной колонны, получим  $R_{\text{н.рез}} = R_{\text{колон}}$

$$Q_1 = \frac{\frac{8\pi}{3} Gh\delta \left\{ \left[ \frac{R_k^2 - R_{\text{вн.п}}^2}{2} + \frac{R_{\text{вн.рез}}^4}{2} \left( \frac{1}{R_{\text{вн.рез}}^2} - \frac{1}{R_k^2} \right) \right] + (R_k^2 - R_{\text{вн.рез}}^2) + \right.}{1} \times$$

$$\times \frac{\frac{3}{16h^3} \left( \frac{R_k^4 - R_{\text{вн.рез}}^4}{2} + \frac{R_{\text{вн.рез}}^4}{2} \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{вн.рез}}^2} - \frac{1}{R_k^2} \right) \right) + (R_k^2 - R_{\text{вн.рез}}^2) \frac{4}{3h} + \frac{1}{16h^3}}{1} \times$$

$$\times \frac{\left( R_k^4 - R_{\text{вн.рез}}^4 + R_{\text{вн.рез}}^4 \cdot \ln \frac{R_k}{R_{\text{вн.рез}}} - R_{\text{вн.рез}}^2 (R_k^2 - R_{\text{вн.рез}}^2) \right)}{R_k - \frac{R_{\text{вн.рез}}^2}{R_k}} \quad (9)$$

где соприкосновения наружной поверхности уплотнительного элемента с внутренней поверхности эксплуатационной колонны.

Минимум потенциальной энергии уплотнительного элемента достигается при условии Эйлера [2]:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a_k} = 0 ; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \theta_k} = 0 \quad (10)$$

Тогда из (3) с учетом (4), (8) и (9) получим выражение для определения постоянной  $a_k$ .

$$a_k = \frac{Q_q \cos^4 \alpha}{\frac{8G\pi}{3h} \left[ \left[ \frac{R_k^2 - R_{\text{вн}}^2}{2} + \frac{R_{\text{вн}}^4}{2} \left( \frac{1}{R_{\text{вн}}^2} - \frac{1}{R_k^2} \right) (R_k^2 - R_{\text{вн}}^2) + \frac{3}{16h^3} \right] \times \right.} \quad (11)$$

$$\left. \times \frac{\left( R_k^4 - R_{\text{вн.рез}}^4 \right) + R_{\text{вн}}^4 \ln \frac{R_k}{R_{\text{вн.рез}}} - R_{\text{вн}}^2 (R_{\text{вн}}^2 - R_{\text{вн}}^2) \right] \Bigg\}$$

Из условия первого соприкосновения и уравнения (4) с учетом  $U \Big|_{\substack{z=h \\ i=R}} = \delta$  получим

$$Q_1 = \frac{h\delta\pi G \left\{ \frac{8}{3h} \left[ \frac{R^2 - R_{\text{вн.п}}^2}{2} + \frac{r_0^4}{2} \left( \frac{1}{R_{\text{вн.п}}^2} - \frac{1}{R^2} \right) \right] + (R^2 - R_{\text{вн.п}}^2) \frac{4}{3h} \right.}{\left. + \frac{1}{18h^3} \left( \frac{R^4 - R_{\text{вн.п}}^4}{4} + R_{\text{вн.п}}^4 \ln \frac{R}{R_{\text{вн.п}}} - R_{\text{вн.п}}^2 (R^2 - R_{\text{вн.п}}^2) \right) \right\}} \times \quad (12)$$

$$\times \frac{\left( R - \frac{R_{\text{вн.п}}^2}{R} \right) \cos^4 \alpha}{\left( R - \frac{R_{\text{вн.п}}^2}{R} \right) \cos^4 \alpha}$$

где  $\delta$  – зазор между наружной поверхностью уплотнителя и внутренней стенкой корпуса сальника;  $R$  – наружный радиус уплотнителя.

Из (12) видно, что первое соприкосновение наружной поверхности уплотнителя со стенкой эксплуатационной колонны происходит в его нижнем сечении, причем радиальная деформация наружной поверхности уплотнителя имеет линейный характер.

Дальнейшее увеличение осевой нагрузки приводит к деформации уплотнителя до соприкосновения его наружной поверхности по всей высоте со стенкой эксплуатационной колонны (рис. 1). При этом ради-

альная деформация уплотнителя, удовлетворяющая граничному условию, может быть принята в виде

$$U_1 = b_k \frac{h - z}{h^2} \left( r - \frac{r_0^2}{r} \right) \quad (13)$$

где  $u_1$  – радиальная деформация уплотнителя;  $b_k$  – постоянная, подлежащая определению.

Из условия несжимаемости (13) материала уплотнителя имеем

$$W_1 = b_k \frac{(h - z)^2}{h^2} \quad (14)$$

где  $W$  – осевая деформация уплотнителя.

Потенциальная энергия при дожатии уплотнителя до соприкосновения его наружной поверхности со стенкой эксплуатационной колонны по всей высоте с учетом осесимметричности деформации имеет вид:

$$\Pi = 2\pi G \int_{r_0}^R \int_0^h (\varepsilon_{r_1}^2 + \varepsilon_{\theta_1}^2 + \varepsilon_{z_1}^2 + \frac{1}{2} \gamma_{r_{z_1}}^2) r \cdot dr dz - \Delta Q_2 \quad (15)$$

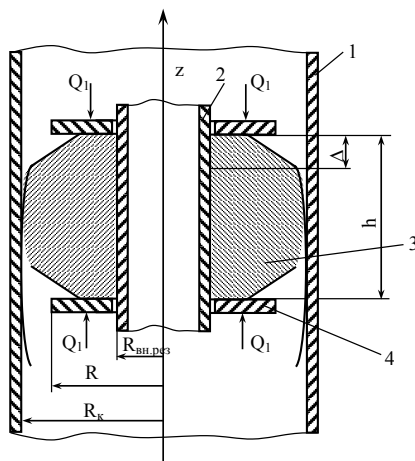
Из (15) с учетом (13), (14) и минимума потенциальной энергии имеем

$$b_k = \frac{P_2 \cos^4 \alpha}{2\pi G \left\{ \left[ R_{\text{в.р}}^2 - r_{\text{вн.р}}^2 - r_{\text{вн.р}}^4 \left( \frac{1}{r_{\text{д.г.}}^2} - \frac{1}{R^2} \right) \right] \right\} + 3h(R^2 - R_{\text{вн.р}}^2) + \frac{1}{4h^3} \left( \frac{R^4 - r_{\text{вн.р}}^4}{4} - \frac{R_{\text{вн.р}}^4 \ln R}{R_{\text{вн.р}}} - r_{\text{вн.р}}^2 (R^2 - R_{\text{вн.р}}^2) \right)} \times \quad (16)$$

$P^2$  – осевая нагрузка, необходимая для сжатия уплотнителя до соприкосновения его наружной поверхности со стенкой эксплуатационной колонны по всей высоте.

Из условия  $U \Big|_{\substack{z=h \\ r=R}} = \delta$  получим с учетом (9) и (12) получим

$$Q_2 = \frac{\delta h \pi G \left\{ \frac{8}{3h} \left[ \frac{R^2 - r_0^2}{2} + \frac{r_0^4}{2} \left( \frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{R^2} \right) \right] + \frac{4}{3h} (R^2 - r_0^2) + \frac{1}{32h^3} \left( \left( \frac{R^4 - r_0^4}{4} + r_0^4 \ln \frac{R}{r_0} - r_0^2 (R^2 - r_0^2) \right) \right) \right\}}{\left( R - \frac{r_0^2}{R} \right) \cos^4 \alpha} \times \quad (17)$$



**Рис. 1. Расчётная схема пакера**  
**1 – эксплуатационная колонна; 2 – ствол пакера;**  
**3 – уплотнительный элемент; 4 – шайба.**

После полной деформации уплотнителя, когда его наружная поверхность полностью соприкасается со стенкой эксплуатационной колонны, необходимо еще добиться герметичности. Она достигается путем увеличения осевой нагрузки. При этом дифференциальное уравнение, описывающее равновесие элемента уплотнителя, с учетом несжимаемости его материала имеет вид [2]:

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{2f}{R - r_0} = 0 \quad (18)$$

где  $\sigma_z$  – осевое напряжение в любом поперечном сечении уплотнителя;  $f$  – коэффициент трения между уплотнителем и стенками эксплуатационной колонны.

Из (18) имеем

$$\sigma_z = \sigma_{z_0} \exp\left(-\frac{2fz}{R - r_0}\right) \quad (19)$$

где  $\sigma_{z_0}$  – осевое напряжение в поперечном сечении уплотнителя в месте приложения силы  $P_3$ .

Для определения характера распределения удельного давления между наружной поверхностью уплотнителя и стенкой эксплуатаци-

онной колонны необходимо суммировать эпюры его распределения на втором и третьем этапах.

На втором этапе, когда происходит сжатие наружной поверхности уплотнителя по всей его высоте до стенки корпуса, радиальное напряжение может быть определено так [2]:

$$\sigma_{r_1} = 2G\varepsilon_{r_1} + S \quad (20)$$

Из (20) с учетом  $\sigma_{r_1} \Big|_{\substack{r=R \\ z=0}} = 0$  и (13) имеем

$$\sigma_{r_1} = 2 \frac{G\delta z}{(R - \frac{r_0^2}{R})h} (1 + \frac{r_0^2}{R^2}) \quad (21)$$

$$\sigma_r = \sigma_{r_1} + \sigma_{r_2} = \sigma_{z_0} \exp(-\frac{2fz}{R - r_0}) + 2 \frac{G\delta z}{(R - \frac{r_0^2}{R})h} (1 + \frac{r_0^2}{R^2}) \quad (22)$$

Перейдем к рассмотрению характера распределения удельного давления между наружной поверхностью эксплуатационной колонны и внутренней стенкой уплотнителя, определяемого из (4), (9) и (15).

На первом этапе, когда происходит первое соприкосновение наружной поверхности уплотнителя со стенкой эксплуатационной колонны, удельное давление между поверхностью уплотнителя и со стенкой эксплуатационной колонны может быть определено как

$$\sigma_{r_0} = 2G\varepsilon_r \Big|_{r=R_{\text{вн.п}}} + S \quad (23)$$

Из (23) с учетом (4) и условия  $\sigma_r \Big|_{r=R} = 0$  имеем

$$\sigma_r \Big|_{r=R} = 2G \frac{a_z}{h^2} (1 - \frac{R_{\text{вн.п}}}{R^2}) \quad (24)$$

На втором этапе, когда происходит полное соприкосновение наружной поверхности уплотнителя с внутренней стенкой эксплуатационной колонны, удельное давление между поверхностями колона и уплотнителя определяется из (19) с учетом (9) и условия  $\sigma_r \Big|_{\substack{z=0 \\ r=r_0}} = 0$

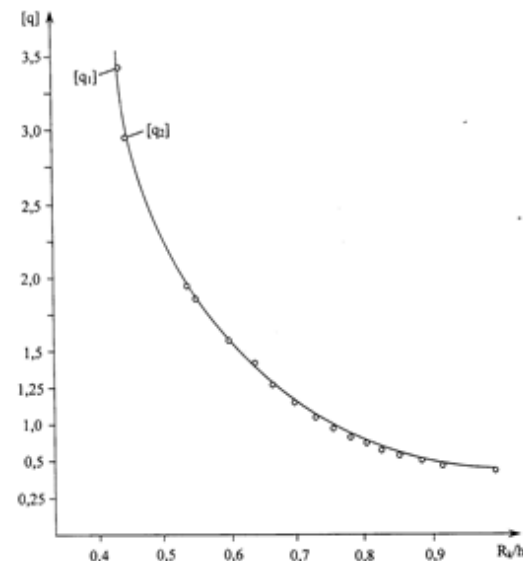
$$\sigma_{r_0}^* = -4BG \frac{z}{h^2} \quad (25)$$

Суммарное удельное давление

$$\sigma_r \Big|_{r=R_{\text{вн.п}}} = 2G \frac{A_z}{h^2} (1 - \frac{R_{\text{вн.п}}}{R^2}) - 4BG \frac{z}{h^2} + \sigma_{z_0} \exp(-\frac{2fz}{R - R_{\text{вн.п}}}) \quad (26)$$



На рис.2 представлены зависимости  $[q_1] = Q_1$  и  $[q_1] = Q_2$  от  $\frac{R_k}{h}$  при  $R$  вн.рез. Как видно из рисунка 2, с ростом  $\frac{R_k}{h}$  значения  $[q_1]$  и  $[q_2]$  уменьшаются.



**Рис. 2. Зависимость безразмерного удельного давления уплотнителя пакера от безразмерных диаметрических параметров**

Таким образом, полученные зависимости (16) и (17) показывают, что равномерного распределения удельного давления между наружной поверхностью уплотнителя и стенкой эксплуатационной колонны, наряду с другими факторами многое зависит от уплотняемого зазора  $\sigma$ .

### **3. Исследование осложнения нагруженности уплотнителя пакеров с применением штангового глубинного насоса**

Основную роль в герметизации пакерных устройств (с применением штангового глубинного насоса) выполняет уплотнительный элемент, который принимает на себя избыточное давление, действия

среды и температуры, различных видов нагружения его при посадке и в процессе уплотнения (работу). Из практики известно, что действия осевых сил и давления часто нарушают герметичность упражнения. Особенно при работе пакера с ШГН (штангового, глубинного насоса) возникает дополнительное динамическое усилие, которое передается уплотнителем пакера [3; 4]. В некоторых случаях эксплуатации это равновесие нарушается, так как некоторые из сил нейтрализуются условиями работы труб или их закреплением пакерами.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся случаи возникновения осевых сил. При этом отсутствующие силы, приводящие к нарушению равновесия, будем брать с обратным знаком [7].

I. Концы труб закреплены с пакером и на устье. Днище снизу отсутствует и  $P \neq 0$ ,  $P_H = 0$ . В этом случае растягивающее кольцевое напряжение  $\sigma_k = P_B \cdot d / 2\sigma$  вызывает в заземленных трубах растягивающее осевое усилие, которое передается в уплотнители пакера:

$$N_1 = \sigma_k \mu S \quad (27)$$

Подставляя в (27) значения  $\sigma_k = P_B \cdot d / 2\sigma$ ,  $S = \pi d_{cp} \sigma$ ;  $F = \pi d^2 / 4$  (площадь в свету) и принимая  $d_{cp} = d$ , получим

$$N_1 \approx 2P_B \cdot F_B \cdot \mu \quad (28)$$

где  $\mu$ -коэффициент Пуассона так как нижний конец не заглушен, то следует взять со знаком минус. Суммарные знаки сжимающие усилия, действующие вниз, в месте заделки пакера:

$$N_{R1} = 2P_B \cdot F_B \cdot \mu - P_B F_B \quad (29)$$

Усилие  $N_{R1}$  будет сжимающим и момент вызывает продольный изгиб.

II. То же закрепление но  $P_B=0$ ,  $P_H = 0$

В этом случае

$$\sigma_k = -P_H \cdot D / 2\sigma \text{ и } N_2 = -2P_H \cdot \mu F_H \quad (30)$$

где  $F_H = \frac{\pi D^2}{4} = 0,785 D^2$

$F_H$  – площадь сечения трубы по наружному ее диаметру.

Поскольку недостающая до равновесия сжимающая сила ( $-P_H \cdot F_H$ ) на днище отсутствует, берем ее с обратным знаком. Результирующая осевая сила после аналогичных преобразований

$$N_{R2} = P_H \cdot F_H (1 - 2\mu) \quad (31)$$

III. То же закрепление, но  $P_b \neq 0$ ;  $P_H \neq 0$ P. В аналогично рассмотренном случае получим

$$N_{R3} = (1 - 2\mu) \cdot (P_H \cdot F_H - P_B \cdot F_B) \quad (32)$$

IV. То же закрепление  $P_H = P_B = 0$ , но внутри труб находится жидкость с плотностью. Действие жидкости на трубы может быть приравнено действию среднего давления

$$(-P_H \cdot F_H)N_{R2} = P_H \cdot F_H (1 - 2\mu) \quad (33)$$

$P_H = P_B = 0$ , но внутри труб находится жидкость с плотностью  $\rho_B$ . Эпюра давления жидкости на трубы. Действие жидкости на трубы может быть приравнено действию среднего давления

$$P_{cp} = \rho_B gH / 2 \quad (34)$$

Тогда аналогично рассмотренному выше при значении  $\mu = 0,28$  получим

$$N_{R4} = -0,72\rho_B gH F_B \quad (35)$$

V. При действии давления жидкости. как изнутри, так и снаружи НКТ (при  $\mu = 0,28$ ):

$$N_{R5} \approx 0,44(P_H \cdot F_H - P_B \cdot F_B) + 0,72gH \cdot (\rho_H F_H \rho_B F_B) \quad (36)$$

VI. Вес столб жидкости при движении плунжера вверх снимается с труб и передается на плунжер. При этом равновесие нарушается, так как растягивающая сила, снимаемая с труб и создающая опасность продольного изгиба,

$$N_{R6} = -\rho_{ж} \cdot g \cdot H \cdot F_H \quad (37)$$

где  $-F_H$  площадь плунжера.

При диаметре плунжера  $D_{\Pi}$ ,  $F_{\Pi} = \pi D_{\Pi}^2 / 4$

#### 4. Факторы, определяющие герметизирующую способность уплотнения

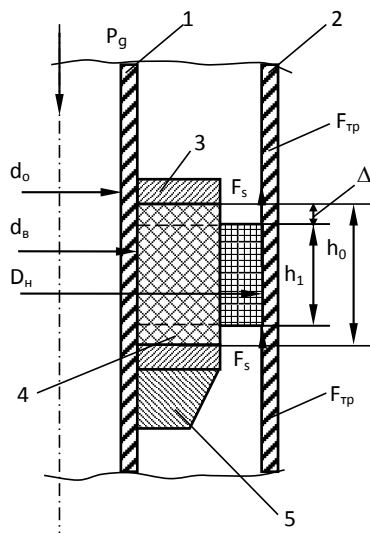
Степень деформации уплотнительного элемента должна быть достаточной, чтобы удержать уплотнительные элементы от вытяжки из места установки-посадки при действии на него давления герметизируемой среды и для обеспечения герметичности при действии того же давления осевой деформации.

В месте (относительно) посадки под шайбой уплотнительного элемента пакера будет

$$\varepsilon_{O_A} = \frac{(h_0 - h_1)}{h_0} \quad (38)$$

В месте сжатия боковой части уплотнительного элемента по высоте  $h_1$  деформации сжатия:

$$\varepsilon_{бок} = (h - h_1) / h_1 \quad (39)$$



**Рис. 3. Расчётная схема уплотнительного элемента пакера:**  
**1 – ствол; 2 – эксплуатационная колонна; 3 – опорная шайба;**  
**4 – уплотнительный элемент; 5 – конус**

Начальное контактное напряжение, созданное при деформации уплотнительного элемента, может быть найдено из уравнения [6]

$$\sigma_0 = E(1 + 2\mu_{тр} \Phi) \frac{\varepsilon_{ос}}{\varepsilon_{бок}} \quad (40)$$

где  $\Phi$  – фактор формы, равный:

$$\Phi = \frac{S_{он}}{S_{бок}} = \frac{D_{сн.к}^2 - D^2}{4D_{вн} \cdot h_0} \quad (41)$$

Условием обеспечения устойчивости уплотнения, действующего на тело уплотнительного элемента избыточного давления  $P$ , является

$$E_{mp} = P_{\Delta P} S_{eff} \quad (42)$$

где  $S_{eff}$  – эффективная площадь уплотнения, т.е. величина характеризующая способность уплотнительного элемента преобразовывать давление в осевую силу:

$$S_{eff} = \frac{\Delta Q}{\Delta P} \quad (43)$$

где  $\Delta Q$  – изменение усилия в уплотняемой поверхности в контакте с уплотнением.

$\Delta P$  – изменение давления в скважине (над или под пакера).

$\Delta P_{\Delta P}$  – давление, необходимое для осуществления применения уплотнителя контактных поверхностей.

Тогда полное перемещение уплотнительного элемента при проявление самоуплотнения будет:

$$\Delta = \Delta_0 + \Delta_p \quad (44)$$

Также сила трения на поверхностях контакта уплотнительного элемента составляет:

$$F_{mp} = \mu_{mp} \cdot F = \mu_{mp} \cdot \sigma \cdot \pi \frac{D_{в.к.}^2 - D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot \mu_{mp} \cdot E \cdot (1 + \mu_{mp} \cdot \frac{D_{в.к.}^2 - D^2}{4}) \cdot (D_{вн.к}^2 - D^2) (\frac{h_2 - h_1}{h_2}) \quad (45)$$

Из условия устойчивости с учетом значения эффективной площади уплотнения найдем значение давления  $P_{\Delta P}$ , вызывающего полное перемещение уплотнения, при котором уплотнитель не вытягивается из места установки (посадки):

$$P_{\Delta P} = \frac{\mu_{mp} E (1 + \mu_{mp} \cdot \frac{D_{вн.к}^2 - D^2}{D_{вн.к} \cdot h_o}) (D_{вн.к}^2 - D^2) (h_0 - h_2)}{h_2 \cdot (D^2 + Dd + d^2)} \quad (46)$$

При действии указанного давления  $P_{\Delta P}$  уплотнителем элемента герметизация обеспечивается благодаря проявлению эффекта самоуплотнения в результате увеличения контактного напряжения до значения  $\sigma^*$ ,

$$\sigma^* = \sigma_0 + \alpha P_{\Delta P} \quad (47)$$

где  $\alpha$  – коэффициент передачи давления, для уплотнения пакера  $\alpha = 0,85...0,95$ .

Условие герметичности соединения выражается зависимостью:

$$\sigma^* \geq P_{\Delta P} \quad (48)$$

Сохранение герметичности соединения при температуре и в процессе длительной эксплуатации связано с уменьшением начального напряжения вследствие изменения свойств резины (уплотнению) в этих условиях [6]:

$$\sigma(t, \tau) = \sigma_0 K \beta \quad (49)$$

где  $K_\epsilon$  – коэффициент восстанавливаемости резины при температуре:

$$K_\epsilon = \frac{h_1 - h}{h_0 - h} \quad (50)$$

$h_1$  – размер восстанавливающегося уплотнителя после снятия нагрузки при данной температуре:

$\beta$  – относительная остаточная эластичность резины [6]

$$\beta = 1 - H \quad (51)$$

$$\text{где } H = \frac{E_{осм}}{E} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \quad (52)$$

$h_2$  – высота уплотнителя после снятия нагрузки

Еост – остаточная деформация :  $E_{осм} = \left( \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \right)$

Тогда из (12) получим:

$$\sigma(t, \tau) = \sigma_0 K_b \cdot \beta + \alpha \cdot P_{\Delta P} \quad (53)$$

Или, подставляя значение  $\sigma_0$  и  $P_{\Delta P}$ , после преобразования, получим:

$$\sigma^*(t, \tau) = E \left( 1 + \mu_{mp} \frac{D_{вн.к}^2 - D^2}{2D_{вн.к} h_0} \right) \cdot \left( \frac{h_0 - h_2}{h_2} \right) K_\epsilon \cdot \beta + \alpha \cdot \mu_{mp} \cdot \frac{D_{вн.к}^2 - D^2}{D^2 + D \cdot d + d^2} \quad (54)$$

## 5. Выводы

1. Разработана методика расчета параметров герметизации уплотнительных узлов пакера.

2. Установлено что, равномерное распределение удельного давления уплотнителя пакера зависит от уплотняемого зазора.

3. Полученное аналитическое выражение позволяет по заданной характеристике резины рассчитать продолжительность сохранения герметичности при давлений  $P_{\Delta P}$ , уплотнения пакера (модулю  $E$ , коэффициенту  $K_\epsilon$  восстанавливаемости при температурах, относительной остаточной эластичности коэффициенту трения  $\mu_K$ ) и геометрическим параметрам уплотнению пакера и его пакерующего узла.

### Список литературы:

1. Бидерман В.Л., Сухова Н.А. Монтаж, эксплуатация и ремонт скважинных штанговых насосных установок : Справочник. Баку : Элм, 1993. 208 с.
2. Мамедов В.Т., Ханкишиева Т.У. Определение оптимальной формы уплотнения сальника штока штанговых скважинных насосов. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. Москва, 2015. С. 31–33.
3. Песляк Ю.А. Расчет напряжений в колоннах труб нефтяных скважин. Москва : Недра, 1973. 216 с.
4. РДО653-39-72. Методика расчета проектирования уплотнительных узлов пакеров, обеспечивающих эффект самоуплотнения. Баку: ОКБ Нефтемаш, 1992. 18 с. (Мамедов В.Т., Гурбанов Р.С.).
5. Протураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. Изд. 2-ое перераб. и доп. Москва : «Машиностроение», 1977. 216 с.
6. Зайцев Ю.В., Максutow Р.А., Асфандияров Х.А. Оборудование для предотвращения открытых фонтанов нефтяных и газовых скважин. Москва : Недра, 1973. 224 с.
7. Касумова С.А., Гусейнли З.С., Мамедов Г.В. Исследование осложнения нагруженности уплотнителя пакеров при посадке и в процессе уплотнения его с применением штангового глубинного насоса. Известия высших технических учебных заведений Азербайджана. Баку, 2012. № 2(78). С. 19–22.
8. Мамедов В.Т., Асланов Дж.Н., Байрамов Ф.Г., Гусейнли З.С. Методика расчета параметров герметизации уплотнительного узла пакера применяемых при ремонте скважин. Global Science and Innovation Materials of the VIII International Scientific Conference, JUNE 22<sup>ND</sup>-23<sup>RD</sup>, 2016.
9. Гусейнли З.С. Факторы, определяющие герметизирующую способность уплотнения пакерного оборудования. Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. Москва : ВНИИОЭНГ, 2015. № 2. С. 25–28.

### References:

1. Biderman V.L., Sukhova N.A. Installation, exploitation and repair of down-hole sucker pumping units: Directory. Baku: Elm, 1993. 208 p.
2. Mamedov V.T., Khankishieva T.U. Determination of the optimal sealing shape of the stem seal of sucker rod pumps. Equipment and technologies for the oil and gas complex. Moscow, 2015. Pp. 31–33.
3. Peslyak U.A. Calculation of stresses in pipe columns of oil wells. Moscow: Nedra, 1973. 216 p.
4. RDO 653-39-72. The calculating methodology for the design of sealing packer knots providing the effect of self-sealing. Baku: DS Neftemash, 1992. 18 p. (Mamedov V.T., Gurbanov R.S.).
5. Proturaev V.N., Dyrda V.I. Rubber parts of machines. Ed. 2nd rebuild. and add. Moscow: "Engineering", 1977. 216 p.
6. Zaitsev U.V., Maksutov R.A., Asfandiyarov H.A. Equipment for the prevention of open fountains of oil and gas wells. Moscow: Nedra, 1973. 224 p.

7. Kasumova S.A., Guseynli Z.S., Mammadov G.V. Research of complication of packers compactor loading at its landing and sealing process by application of deep rod pumps. News of Azerbaijan high technical educational institutions. Baku, Azerbaijan, 2012. № 2(78), pp. 19–22.

8. Mammadov V.T., Aslanov J.N., Bayramov F.Q., Huseynli Z.S. Calculation method of hermetic seal assembly parameters of the packer used during repairing wells. Global Science and Innovation Materials of the VIII International Scientific Conference, JUNE 22<sup>ND</sup>-23<sup>RD</sup>, 2016.

9. Huseynli Z.S. Faktors that determine packing ability of packer equipment seal. Equipment and technologies for oil and gas complex. Moscow: VNIIOENG, 2015. № 2.



**DEVELOPMENT OF INFOLOGICAL MODELING METHODS  
IN SOCIAL COMMUNICATION PROBLEMS FOR CREATION  
PERSPECTIVE COMPLETED MATERIALS**

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ІНФОЛОГІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ  
В ЗАДАЧАХ СОЦІАЛЬНОЇ КОМУНІКАЦІЇ ДЛЯ СТВОРЕННЯ  
ПЕРСПЕКТИВНИХ СКЛАДЕНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Georg Baranov<sup>1</sup>**  
**Olena Komisarenko<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-50>

**Abstract.** Due to the spread of information and telecommunication technologies, social communication gets various forms of citizens rapid activity. The subject of this study is the models, methods and tools of information technology that allow us to focus the efforts of each system intellectual agent on a synergistic interaction discourse for solving global noosphere problems. The methodology for strategic integration of public knowledge at each management decision-making step involves describing and fixing in the unified form protective actions against future risks for ecological life forms on Earth planet. The purpose of the research is the development of info logical modeling methods for creation of perspective composite materials with thermodynamic influence on the application of the necessary and sufficient sequential properties processes, which satisfy the set social requirements for the future ITS exploitation. The main criterion, which integrates partial technical and technological solutions, is to determine the single desired safety of life in each city and in all environmental fields. Minimizing the cost of heterogeneous resources is defined as the search for effective methods for modeling complex dynamic systems in the conditions of forecast states of external dynamic-global environment non-stationary diverse phenomena. Tasks and orders transformation for

---

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Department of Information Systems and Technologies,  
National Transport University, Ukraine

<sup>2</sup> Assistant Lecturer, Department of Information Systems and Technologies,  
National Transport University, Ukraine

future technologies modeling into a complex technology utilization of accumulated waste without secondary pollution and utilizes the accumulated waste. In the processes of thermodynamic self-propagating synthesis, the processing of substances – local contamination into perspective composite materials for different transport industries takes place. The principles of NM modeling and "cloud" participation of dispersed intellectual agents of different hierarchical levels of multi-agent manufacturing organizations are analyzed. The following components of the KM-PD system are determined. Integrated self-organization tools have linguistic applications to accelerate communication. Real-time language controls manage and filter information flow. The means of predicative unified logic formalize the innovative laws of the resulting technical and technological solutions. Processor infological models and experience of their application provide conditions for large-scale implementations of machines and work of future industrial environmentally friendly industries. The means of knowledge bases adaptive self-organization stimulate the further development of problem situations infological modeling methods, which, thanks to the proposed tools, turn into current resource-efficient technological processes. The command and control management principles for software and hardware complexes for the operational modeling of future variants of heterogeneous processes interaction are proposed. The proposed KM-PD system implements the synthesis of adequate actual information technologies models and repositories. The proposed knowledge representation models are intended to intensify the processes of ecological diversity global protection.

### 1. Вступ

Розвиток сучасних галузей комп'ютеризованих технологій людської діяльності все більше залежить від методів: забезпечення обчислювальної якості; гарантованого рівня надійності; поточної відмовостійкості інструментальних засобів; визначення умов конкурентної спроможності й живучості. Існуючі традиційні інформаційні технології (ІТ) та системи оперативного управління не зважаючи на значне розширення Internet, як соціальної комунікації вже не задовольняють потреб майбутніх виробничих та організаційних завдань. Бажання на перспективне створення шляхом завчасного покращення конкретно оцінюваних станів не перетворюється у швидко отримані матеріали,

продукти, товари, послуги, тому, що всі складові частки змінюються у просторі та часі єдиного просторово-часового континууму (ПЧК) Всесвіту.

Перспективні об'єкти майбутнього застосування можливо класифікувати на складні динамічні системи (СДС), що реагують на передбачені функціональні впливи гетерогенних факторів нестационарного середовища [1–4]. Результати дії ризикованих збурень на контактні поверхні СДС обумовлюють реальні відхилення контрольованих цільових станів. Вони разом з передбаченими засобами захисту на рівні спеціальних матеріалів формують бажаний стан, як гарантовану живучість та функціональну стійкість інноваційних СДС. Таким чином за замовлень ведучих галузей, включаючи Intelligent Transportation Systems (ITS) застосування перспективних складених матеріалів (ПСМ) гостро потрібно, бо інакше втрачаються темпи розвитку безпечного, розумного, екологічного, мобільного транспорту. Тому соціальні комунікації та засоби Internet об'єднують зусилля інтелектуалів на інтенсивний пошук відповідних критеріїв оцінювання та методів комплексного моделювання для забезпечення існування ефективних технологій майбутнього. Лише за умов існування техніко-технологічних рішень (ТТР) всі замовлені на майбутнє показники якості та ефективності експлуатаційних режимів ПСМ не вийдуть з зони Парето за обставин конструктивного витримування збурень від зовнішнього оточуючого середовища (ЗНОС). До наближення наступного горизонту проблемні ситуації поки ще прогнозуємо, передбачуємо й від цього проектуємо форми захисту СДС на вже існуючих програмно-апаратних комплексах (ПАК) типу MatLab, MatCad, Mapl, DataManing, САПР, тощо. Будь-яке подальше покращення досягається завдяки розробці ТТР та застосування адекватних цифрових робочих оперативних моделей (РОМ), що разом з типовими програмними модулями (ТПМ) засобів ІТ, допомагають реалізовувати відповідні явні процеси.

## **2. Методологія стратегічної інтеграції знань**

При збільшенні прогнозного інтервалу передбачення та кроку прийняття управлінських рішень, наприклад, фінансування захисних дій від майбутніх ризиків зі збігом небажаних обставин у глобальних формах життя на планеті зростає складність загроз й масштаб витрат

ресурсів на захист від негараздів. Тому подолання реальної складності ризиків й невизначеності можливе завдяки ієрархічній самоорганізації соціальної комунікації для чого потрібна побудова ефективних інтерфейсних інфологічних моделей для гетерогенного використання наявних ПАК та додаткових спеціалізованих моделей і методів. Стратегічні досягнення у сфері автоматизації виконання бажаних функцій і завдань виробничого й організаційного управління у перспективних багаторівневих структурах інноваційних СДС будуть виникати на основі знання ТТР, що гарантують створення ПСМ. Досягнення очікуваних значень замовлених властивостей у заплановані терміни значно оптимізує повні витрати ресурсів на принципах самонавчання та Agile [1] й тому є безумовно актуальною.

Мета. Розвиток методів інфологічного моделювання в задачах із термодинамічних впливів на процеси створення ПСМ, що задовольняють заданим вимогам достатніх властивостей на експлуатацію.

### 3. Задачі соціальної комунікації

Авторська ідея дієвого об'єкта (АВІДО) стосовно теми дослідження процесів створення інноваційних матеріалів полягає у триєдності інформаційних відношень при розв'язанні складних (проблемних-нетривіальних) задач. Вони належать єдиній метрологічній системі вимірювання параметрів [1] та випробування техніко-технологічних рішень (ТТР) [2] засобами КМ-ПД.

Формалізовано методи та методики ІТ для процесів інфологічного моделювання ПІМ та ергатичного пошуку ефективних управлінських ТТР за інтегральними критеріями безпеки. КМ-ПД явно не втручається у сфери технології реального виробництва складених матеріалів. Але всі моделюємі ТТР імітуємо без викидів в атмосферу та теплових загроз для життя.

Нагадаємо формальне визначення поняття «задача»:

$$\theta = \langle \zeta, Z, F, \delta \rangle, \quad (1)$$

де  $\theta$  – тема або початковий інформаційний об'єкт задачної системи;

$\zeta$  – перелік цілевказівок у вигляді комплексу інструкцій-настанов;

$Z$  – задачний комплекс станів, що у вигляді  $Z_0$  початкового, проміжного  $Z_i$  поточного та кінцевого-цільового  $Z_n$  станів, вже фіксують

сутність, особливості та специфіку даного класу перетворень у межах мікропроцесорних управлінських дій ПАК згідно ТТР інтелектуального агента системи (IAS), що реалізує комплексне моделювання;

$F$  – функціональний комплекс правил продукції, що заздалегідь вже визначено згідно алгоритму розв’язку задачі у вигляді послідовності типових операторів, щоб досягати  $\zeta_n$  мети – кінцевого результату.

$\sigma$  – початковий символ АВІДО задачної системи для технологій автоматного переходу від початкового стану у термінальний кінцевий з фіксуванням ТТР.

Авторська розробка сутності, особливості та специфіки (СОС) в інформаційних технологіях (ІТ) для запропонованого нами ПАК КМ-ПД враховує проблемну галузь діяльності ПЕВО. Створення складених матеріалів полягає у інтерпретації вхідних понять (речень), людських слів, в формі кодів.

Сутність ПІМ КМ-ПД полягає у цілеспрямованому перенесенні кожного ключового поняття з цілісної порції завдання на мові директивно-командного управління у іншу сферу ЄІП ІТ, де продовження мовної теми ІАС далі раціонально реалізує автомат-програма ДУМ з спеціалізованими інформаційними процедурами. Під час пошуків керованого «бігання» (пряме й зворотне у межах комунікаційного інтерфейсу) можливо назвати дискурсивним (від лат. *discursus*; англ. *discourse*; франц. *discours*; нім. *diskurs*; італ. *discorso*). Першим «дискурс про метод» («*Discours de la method*») у 1637 р.) визначив Р. Декарт. В нашому автоматизованому діалозі реально є пара колообігів: у нервовій мережі ІАС є ПЕВО реальний розмовник; у цифрових автоматах ПАК КМ-ПД, що розпізнають ДУМ значущості означеного. Багаторівневі структури згідно заздалегідь варіюваних правил, принципів, моделей, методів та засобів ІТ забезпечують ЄІП та задану функцію у конкретно описаних умовах задачі моделювання. Внутрішню приховану, або неявну за ознаками замовчування інтелектом КМ-ПД й конкретно ДУМ програмою, але раціональну (*ratio intellectus* майже оптимальну за локальними критеріями) форму реалізує в цілому ПАК КМ-ПД згідно використання особливого (N) змістовного завдання.

Показники запропонованих методів автоматизації залежать не лише від обізнаності конкретного ІАС-користувача-автора АВІДО, а також від накопичених ресурсів ПАК з КМ-ПД спроможністю вико-

ристовувати власні внутрішні й зовнішні «хмарні» ресурси інтегрованого середовища інформатизованої ноосфери. Практика застосування запропонованих принципів *discourse* у інноваційних ІТ сприяє подальшому розвитку математизованого знання у роботах з одночасним інтегрованим ефектом самоорганізації суспільства, де враховуються правильно зроблене надбання у вигляді досвіду особистостей, що спроможні генерувати власні АВІДО. Опис досвіду ІАС у лінгвістичній прагматичній взаємодії з ПАК КМ-ПД сприяє розвитку функціональної семіотики. Накопичене характеризує інтеграційні дії у різних середовищах, ситуаціях, явищах, які змінюються згідно людської діяльності у межах виробничих та організаційних сферах. Наприклад, ПЕВО ITS. Глобальні проблеми чи значно ускладнені актуальні задачі практики можливо успішно формалізувати за варіантами «Мета-проблема-засоби ТТР». Саме *ratio intellectus* у вигляді обізнаної ментальності (*mens* – розум ІАС та одночасно *spiritis* життєва сила за допомогою КМ-ПД прискорювача) забезпечує реальність визначеного у формі АВІДО. Кодовані описи подальших причинно-наслідкових кроків з ситуативно оптимальним вибором ефективних ресурсів, засобів і способів дії (відповідно до можливих змін критеріїв за інноваційними системами цінностей) починають домінувати над «застарілими – попередніми ТТР. Пошуки минулих фаз або спроб Problem зменшення загроз від ризиків та небезпек ЗНОС поки ще не завершилися значним охоплюючим успіхом.

Конкретний автоматизований дискурс семіотичної діяльності в процесах ергатичного моделювання об'єктів практики слід визначати як складене комунікативне явище самоорганізації пари природного ІАС та штучного КМ-ПД інтелектів. В цьому процесі взаємо-самоорганізації учасників на всіх ієрархічних рівнях виробничої та організаційної діяльності відбуваються вкладення еквівалентних понять-структурних фрагментів та утворення нових понять майбутньої метамови для наступних поки ще невизначених горизонтів розвитку інформаційного суспільства. Логіка якого в свою чергу змінюється.

Таким чином науковий дискурс пішов далі від традиційного експертного аналізу взаємозв'язків в кожному окремому описі локального факту до комплексних складних гетерогенних відносин на більш тривалих просторових й часових континуумах, що разом визначають

єдність Всесвіту, цілісність, взаємозалежність розвитку як СДС так й ЗНОС у множині універсуумі.

Запропоновані моделі, методи та засоби застосування ПІМ в ПАК КМ-ПД не лише ілюструють правила й принципи прямих й зворотних динамічних зв'язків між природним ІАС (аналогово-лінгвістичним) розумом та штучним результатом продуктом сучасного ІТ у вигляді спільно формалізованих ТТР. Саме фактично інноваційна звітowa форма ТТР розширює майбутні горизонти. Сенс фіксації взаємовідносин значущості є увага ключової ролі інноваційної частини АВІДО (науковий крок до новизни з доказами істинності) у проблемних Big Data. Відомі документи мають багато заперечень, обмежень, висловлювань неможливості розв'язання проблем, що актуальна особливо для інформаційного суспільства в цілому. Отриманий у дискурсі значущий сенс має пояснення раціонального маршруту у майбутнє з застосуванням реальних ресурсів згідно визначеного документа Plan (лише один етап Agile принципів). Всім відома різниця  $\Delta(t) = |\text{маршрут}(Plan - Fact)| = \varepsilon, \forall |\varepsilon| \gg 0$ .

Тисячоліття реальний рейс, рух за маршрутом (навіть точно за геодезичними вимірами пунктів проходження) відрізняється за фактичними витратами ресурсів й отриманими ефектами, прибутками чи навпаки ситуаційними негараздами. Така прагматика (відхилення й реальні коливання чи локальні чи у цілому) ніколи не змінювали зусиль на прогнозування, передбачення, моделювання й перспективне планування (програмування засобами ІТ). Одночасно розроблялись паралельні організаційні дії для забезпечення функціональної стійкості (спеціальна багатокритеріальні закони управління в особливих випадках контрольованих відхилень з причин фактичних впливів ЗНОС).

#### 4. Мовні засоби real-time управління

Опис математичних задач, що підтримує ПАК КМ-ПД після вводу завдання, потребує явного визначення наступних складових:

- фазові змінні на протязі кожного n-го процесу;
- вектор управління або кортеж керованих із зовні параметрів впливу;
- рівняння (символьні, алгебраїчні та логічні) процесу, що моделюємо;

- обмеження, умови, наявні ресурси й запаси;
- цільова функція оптимізації (згортка багатьох критеріїв);
- робочі параметри, що контролюємо, оцінюємо, управляємо для отримання кінцевого багато параметричного результату;
- екстерна допомога в критичних обставинах роботи ПАК.

Користувач системи КМ-ПД при формуванні робочих моделей (архівних, розрахунково-базових, синтез-моделей режимів) виконує наступні типові операції: побудова оперативної моделі ПСМ на основі зовнішньої або внутрішньо-системної інформації; адаптація робочих моделей до факторів впливу ЗНОС; синтез РОМ з можливою подальшою адаптацією до умов ПЧК. Частину інформації КМ-ПД автоматично копіює та компілює за заздалегідь узгодженими рівнями інформаційного забезпечення. За допомогою мови директивно-програмного управління складаємо інші Big Data. Окреме індивідуальне коригування на кожному з означених фрагментів набуває якісні значення на формування цільової РОМ згідно завдання. Зовнішні дані мають структуру вхідних форматів. Внутрішні це програми з системно-бінарною взаємодією в режимі «Хмара» для спілкування з віддаленими іншими ІАС.

Найбільш важливим для забезпечення ефективності методу автоматизації виконання цих функцій і завдань є етап первинної побудови архівної моделі для конкретних ІТС. Таким чином вирішуємо цілеспрямованість методу на головні організаційні питання: склад моделі М. QI. S; кількість і склад моделі M.RJ.S; принципи подання ER-схем; еквівалентування-заміщення і кодування інформації по восьми типам асоціативних груп. Початкова машинна обробка дозволяє заповнити архівну базу даних паралельно або раніше ніж закінчене форматування бази знань. За один сеанс ІАС керує обробкою будь-якої кількості порцій визначальних даних. Обсяг сфери автоматизації дорівнює кількості, яка у міру готовності носіїв процесних форматів компонент (ПФК) надійшли в ПАК КМ-ПД. Побудова архіву виконується відповідно до наступної послідовності керуючих системних ПФК, що складають типові автоматні функції, а також групові уніфіковані завдання для ДУМ КМ-ПД.

Принципи структурної будови мови КМ-ПД аналогічні для всіх форм методу автоматизації виконання функцій і завдань управління



процесами створення складених матеріалів. Найбільш повно у дискурсі IAS обговорюють дії та директиви, але стисло реалізують введення завдань. Аналогічно об'єктно-орієнтованому програмуванню абстрактні організаційні класи визначаємо інструментально. Наприклад, синтезу розрахунково оперативних моделей (ПОМ) це можливо описати у вигляді наступного програмного завдання.

```
1  Д. Організація видачі архівної інформації по замовленню УСК накази.  
2  (М. RJ-S) - ідентифікатор з назвою моделі.  
3  Н. (Тільки)/(Крім)/(Район) - наказ кортеж конкретного фрагмента.  
4  Список номерів елементів, якщо він потрібен.  
5  Повтор п.2-4 за потребою.  
6  Кінець директиви (Д) для диспетчера СУМ. |
```

Така типізація реалізується засобами Java, Delphi, C# та іншими інструментами конструктора. Перетворення директивного завдання стосовно формування в пам'яті ПАК КМ-ПД, робочої моделі в чіткі реалізуємо прискорено функції для розрахунків або її побудови на основі архівної інформації РБМ, розроблений метод автоматизації передбачає стислий пакет наступного складу:

```
1  Д. Синтез схеми моделі з архіву РБМ.  
2  (М. RJ.S) I (**ПОМ*)—назва синтезованої моделі  
3  Н. (Тільки)/(Крім)/(Район)/((Уном) – предикативні мітки.  
4  (М. RJ. S) – ідентифікатор з назвою моделі, зрозумілий IAS.  
5  (**CWR*) P,V,T,C* – кодовані символи виду інформації.  
6  Список відповідного заданому **CWK*)  
7  Повтор п. 3 – 6 за потребою.  
8  Кінець директиви (Д) для диспетчера СУМ. |
```

Мовний зрозумілий інструментарій та чітка технологія методу для реалізації функціоналу ергатичного моделювання спрямована на прискорення комплексу програмних дій за стандартом OSI.

Аналогічні процедури КМ-ПД – «бібліотека з'єднувачів» та синтезу робочих моделей утворюють інтегровану схему конкретної ІТ.

Крім операцій синтезу на стадіях САПР запропонований метод автоматизації враховує майбутні промислові технологічні процеси, наприклад, функції подрібнення, змішування, стиск, розвиток реак-

ційного продукту. Ці майбутні на стадіях SCADA функції потребують знання керованих варіацій для ситуаційних змінних  $P$ ,  $V$ ,  $T$ ,  $C$  які залежать від  $t$  та  $\theta^0$  температур. Склад та кінцевий продукт залежить від наявності або відсутності будь-яких домішок. Всі ці дані експерт – IAS отримує швидко без затримок у вигляді розрахунково-базових й оперативних моделей, що підтримані ІТ та засобами КМ-ПД.

Переваги впровадження КМ-ПД. Впровадження КМ-ПД покликане задовольняти потребу в повній та своєчасній інформації про формотворення ШКМ, щоб забезпечувати безпеку засобами ІТ за також достатню швидкістю виконання складних завдань, функцій та операцій включаючи методично організований, цілеспрямований, безперервний контроль якості, ефективності, надійності, результативності запропонованого комплексного методу автоматизації виконання функцій і завдань виробничого й організаційного мовного управління термодинамічними процесами створення перспективно складених матеріалів за допомогою лінгвістично-семіотичних інноваційних засобів ПАК КМ-ПД.

Таблиця 1

### Переваги впровадження КМ-ПД

Ефект від впровадження КМ-ПД	
Прямий	Непрямий
1. Зменшення трудомісткості процесу обліку (виключення дублюючого введення інформації; формування єдиної бази даних); 2. Зменшення чисельності допоміжного персоналу для обслуговування сховища в актуальному стані. 3. Економія матеріальних ресурсів, які не витрачаються при імітаційному моделюванні й обґрунтуванні синергетичних ефектів корпоративної мультиагентної самоорганізації.	1. Доступ до даних у режимі real-time й процедур автоматизованих функцій завдань для формотворення складених моделей; 2. Скорочення витрат робочого часу, пов'язаного з зайвим пошуком документообігу (підвищення продуктивності праці: ефективне використання робочого часу і виконання якісно більшого обсягу робіт) (2) ШКМ різних ІТС; 3. Оперативний контроль потоку даних; 4. Автоконтроль інформації; 5. Підвищення рівня професійної підготовки допоміжного персоналу (матеріалознавців ІТС).

За принципами стандартів OSI/IEC, що регламентують майбутній розвиток ІТ у формі широкомасштабного впровадження ПАК різноманітних галузей людської діяльності у попередніх підрозділах за темою визначені системо утворюючі механізми апарату автоматизації стосовно прагматики, семантики, онтології, граматики для задач термодинамічних процесів створення прогресивних (future) складених матеріалів за потреб й завдань ITS. Означена ієрархічна вкладеність гетерогенних шарів не обмежує подальший розвиток ІТ.

### 5. Предикативна уніфікована логіка

Запропоновані засоби КМ-ПД повинні відповідати додатково новітнім ( $next + 1$ ) критеріям майбутнього функціонування ITS. Увага до майбутніх термодинамічних явищ у незалежному ЗНОС вимагає описів кожного гетерогенного впливу природних коливань та імпульсних змін. Прогнозне передбачення тривимірного температурного поля за глобальних тенденцій планетарного масштабу може практично завершуватись наступними трьома наслідковими оцінками  $S(t, x, y, z, u)$  узагальненого стану.

$$S_{i+1} = \begin{cases} 1 - \text{істино, достовірно, не суперечить логіці стану;} \\ \sim - \text{невизначено, є протиріччя, частковий конфлікт;} \\ 0 - \text{точно нічого не змінює бо хибне.} \end{cases} \quad (2)$$

$\forall S_{i+1} \in S(t, x, y, z, u)$  – елемент наступного стану СДС, яка продовжує майбутній розвиток та відповідає всім критеріям й стандартам OSI/IEC.

Лінгвістичні семантичні інтеграції (2) можливо трактувати для локального ПЧК  $S$  як одночасні обставини 3D станів СДС за ключовими правилами

ЯКЦО {1} ТОДІ [звичайні, нормальні, позитивні, const БОН дії/рухи];  
ЯКЦО {~} ТОДІ [позаштатні, небажані, змінні, var АКТ дії/рухи]; (3)  
ЯКЦО {0} ТОДІ [протилежні, зворотні, негативні НОН дії/рухи].

Обидві дві (2) та (3) формалізації логічних висловлень IAS на різних ієрархічних рівнях характеризують один єдиний  $S$  об'єкт але з різних сторін знання реальних тенденцій або варіантів суспільних дій у межах ризиків та невизначеності факторів ЗНОС.

Суспільне узагальнене стандартизоване знання можливо вважати об'єктивним або метамовою, що за тривалим досвідом не суперечить практиці. Вводимо символ метаімплікації « $\Rightarrow$ » у вигляді подвійної стрілки за напрямом. Вираз символічного опису  $P_i \Rightarrow C_j$  можливо одночасно інтерпретувати «якщо посилка чи причина  $P_i$  логічно-істина, тоді заключення чи наслідок  $C_j$  також істина». Тому саме такі відношення між причинами та наслідком прийнято називати клаузой (clause) [4-6]. Клауза це метаопис з фіксацією за допомогою символу « $\Rightarrow$ » відношення порядку за умов еквівалентності описів, що ліворуч та праворуч відносно показника. Логіка встановлює наступні для множин А, В, С три закони. Рефлексивності  $A \Rightarrow A$ ; Антисиметричності якщо  $A \Rightarrow B$ , то  $\bar{B} \Rightarrow \bar{A}$ ; Транзитивності якщо  $A \Rightarrow B$  та  $B \Rightarrow C$ , то  $A \Rightarrow C$ .

У випадках симетрії закони мають уніфікований опис «якщо  $A=B$ , то  $B=A$ ». Логіка висловлювань, для яких існує зв'язок між причиною та наслідком, інтерпретується як розширення логіки Буля [6–10]. Автоматизм переходу від тотожності Буля до істинності клауз, що засобами КМ-ПД моделюємо, полягає у знанні незалежної системи аксіом логіки Буля. Відомо чотири закони з наступними назвами: комутативності, асоціативності, дистрибутивності, нуля та одиниці. Ключовим є елементарне еталонне еквівалентне висловлювання. Воно потрібне завжди, коли ситуативно всі складні висловлювання можливо за допомогою означених логічних операцій над описами лінгвістичних клауз за допомогою еквівалентних кодів-операндів зводити дуже швидко, гнучко й точно до неї (clause Big Data тотожно істинна), наприклад  $A \Rightarrow B \rightarrow A$ .

Звертаємо увагу, що символ імплікації « $\Rightarrow$ » при логічному виводі (доказу) КМ-ПД характеризує  $\exists$  лише суб'єктивну оцінку групи експертів, що компетентні та повноважені. Але їх думка не завжди співпадає з об'єктивною  $\forall$  з причин областей існування (для одного випадки –  $\exists \neq$  для всіх й кожного  $\forall$  кванторів) підмножин в універсальній розширеній множині Всесвіту. Це візуалізують діаграми Вена [11].

У випадках гетерогенного множинного опису причинно наслідкові відношення об'єктивно описує клауза КМ-ПД

$$P_1, P_2, \dots, P_i, P_{i+1}, \dots, P_n \Rightarrow C_1; C_2; \dots; C_j; \dots C_m, \quad (4)$$

Де часткові форми лівих та правих часток називають хорновськими визначеннями. Такі описи можливо робити в сучасних ПАК типу Mat

CAD, MATLAB, DataMinimg або там, де в бібліотеці програмування є засоби логічних мов типу Пролог [9,11].

## 6. Ергатичний інтелект і автоматна якість

В ПАК КМ-ПД уніфіковані процесорні дії ТПМ реалізуються автоматично за участю ППМ відповідно до мовного завдання за директивно-командними принципами стислого виразу з явним замовчуванням попереднього контенту. Тому використання відносин  $R_i(ME, TCC)$ ,  $R_i(MI, BC)$ ,  $R_i(TCC, BC)$  в рамках фрагмента концептуальної бази (ФКБ) запропоновано відновлювати та розкривати засобами ППМ. Ситуативно потрібні об'ємні описи КМ-ПД конкретизує за рахунок явних (по  $S$ -,  $P$ -,  $R$ -,  $M$  - та  $A$ -ознаками) зв'язків в ланцюзі по узагальненим ідентифікаторам об'єктів ІТ, що моделюємо й прогнозуємо.

Розкриття внутрішніх відносин робимо з використанням  $R_0(MA, COC)$ ,  $R_0(MI, AC)$ ,  $R_0(COC, AC)$ . Це дозволяє відповісти на всі уніфіковані кортежі, де питання, пов'язані з особливостями компонент-матеріалів складної системи.

Перехід від абстрактного кодового відношення  $R(X \rightarrow B) = R(X, B)$  до уточнюючого його конкретними відносинами КМ-ПД здійснює зі застосування  $S$ -,  $P$ -,  $R$ -,  $M$  - та  $A$ -ознак. Аналіз куща поняття  $X$  для всіх відносин, пов'язаних з концептом відносин пошукового об'єкта  $Y$ , дозволяє при необхідності автоматично формувати асоціацію. За допомогою її зробимо перехід від  $ME_i$  та  $ME_j$  понять й далі до фрагментів або до їхніх елементів. Якщо сформована асоціація натяку, то можливий швидкий та прискорений пошук по стрілкам з відносинами  $R(ME)$ ,  $R(MA)$ ,  $R(MI)$ ,  $R(TCC)$ ,  $R(COC)$  лінгвістичних чи кодових найменуванням властивостей відповідного  $S$  об'єкта. Якщо сформована асоціація по суміжності, то при пошуку використовуємо пари відносин  $R_i(TCC, BC) - R_j(MI, BC)$  або  $R_0(COC, AC) - R_0(MI, AC)$  в залежності від зовнішнього або внутрішнього типу опису прояву реальних властивостей.

Системна модель бази знань ЄІП представляємо узагальненим структурним графом  $G(B, Q)$  [5], де достатній  $B = \bigcup_{i \in I} V^i$  - вершинний базис, заданий підграфами  $G_{i(k-1)}^{k-1}(V_k^{k-1} H_{ik}^{k-1})$  в  $G^k(V^k, H^k) \in G(B, Q)$ ; множина  $Q = \bigcup_{k=1}^{n+1} \bigcup_{ik=1}^r H_{ik}^{k-1}$  - зв'язки, ребра чи дуги графа. Вони відобража-

ють необхідні відношення  $H_{ik}^{k-1}$  на множині  $V^{k-1}$  підлеглого підграфа. Індекс  $ik$  визначає позицію (адресу) і число елементів  $V^k$  множини, а  $r = \sum ik$  характеризує число елементів вершинного базису сховища КМ-ПД.

Семантичні об'єкти, лінгвістичні змінні і дані (поняття, атрибути, значення) зберігаємо в дев'яти типах записів [4, 6]. Тоді в рамках теми маємо опис, як верховий базис предметної області знання термодинамічних процесів у складних матеріалах з непересічних упорядкованих підмножин:

$$D_{ij} = \bigcup_{i=1}^l \bigcup_{j=1}^k D_{ij}, \forall \{ij \mid D_{ij} \cap D_{in} \equiv \emptyset; D_{ij} \cap D_{mj} \equiv \emptyset\}. \quad (5)$$

Для оптимізації процедури взаємодії з базою знань, нормативне  $\bar{J}$  упорядкування виключає дублювання об'єму даних. Поняття СЕМ, ГТХ зазвичай є термінальними або нуль-графами  $G^0(V^0, H^0)$  для граматики перетворень на семантичній мережі. КМ-ПД для виконавчих ТПМ може сформувати складну, розчленовану структуру даних. Поняття МЕ, МА і МІ відображаємо графами  $G^{k+1}(V^{k+1}, H^{k+1})$ ,  $G^k(V^k, H^k)$  і  $G^{k-1}(V^{k-1}, H^{k-1})$  відповідно.

Відносини доцільних типів в загальному випадку моделюємо  $k$ -парними підграфами і відображаються в ПАК КМ-ПД відповідними фрагментами семантичної мережі. Адресні відносини між записами в ланцюзі (головна – детальна) [3] засобами КМ-ПД встановлюються автоматично відповідно до логічної схеми накопичуваної бази знань. Такі моделі використовуємо при роботі з семантичною мережею ПАК КМ-ПД.

Головний запис визначає базову множину лінгвістичної змінної щодо обраної мети. Елементами базової множини можуть бути детальні записи в командах на виконання. Адресні посилання в зв'язках між семантичними об'єктами істотно підвищують швидкодію затребуваних ТПМ над лінгвістичними змінними. Збільшення числа  $d_{ij} \in D_{ij}$  подовжує ланцюг і знижує швидкодію. Тому доцільна функціонально-математична алгебраїзація семантичних об'єктів, яка на обмежений таким чином коло питань [5] гарантує відповідні результати.

В описах теми використовуємо МЕ-поняття. Тоді зміст та об'єм моделей розкриваємо через МА- та МІ-поняття. В силу вкладеності  $ME_i \supset MA_i \supset MI_k$  (детальні) поняття відношення і істинної особли-

вості об'єктів відображаємо лише через властивості, які задані темою. Приклад опису через МА 1 = <верхній шар>, МА 2 – <середній шар>, МА 3 = <низ-опора>, МА 4 = <матеріал, що навантажуємо> та інші  $MA_j$  – поняття пояснює визначення  $ME_i$  = <моделі елементів КСП для планування засобами КМ-ПД геометрично описаних та механічно з'єднаних шарів>.

### **7. Адаптивна самоорганізація баз знань**

Трирівневе (МА-МІ-СЕМ) розкриття змісту МЕ-поняття в інших відносинах може бути неповним. Тоді експлікація на сукупності цих відносин може стимулювати додаткове завантаження нового кортежу МЕ-понять. Мікрооб'єкт таким же чином можна описати, розглядаючи його (і подібне йому) як складну МЕ-систему з обумовленою областю тематично модельних відносин. Адаптивний розвиток понять бази знань, що таким чином накопичуємо, забезпечує будь-який доцільний рівень деталізації задач моделювання СДС.

Відома тематична стратифікація ІТ з трирівневим системним розкриттям змісту не відповідає розгалуженим загальноприйнятим прийомам OSI класифікації за складом, структурою, функціями та іншими деталізуючими аспектам. Наш підхід заснований на формуванні засобами КМ-ПД автономних тематичних реляційних систем-моделей ІТ, що за певним досвідом ІАС індивідуалізовані за кожним цільовим призначенням. ПІМ мають спільний топологічний базис (рис. 1) на множині понять. Він використовується методами актуалізації дій відповідно пошукового означення документу (ПОД). Топологічна єдність забезпечує перетворення інформації в рамках конкретних відносин (рис. 2) між МЕ-, МА, МІ-, СОС-, ТСС-поняттями і СЕМ- та ГТХ-атрибутами ЄП системи КМ-ПД. Тема (сукупність цілей моделювання) в кодовій формі розкриває цілісний системний зміст. Опис його зафіксовано у пам'яті згідно конкретному графу  $G(B, Q)$ , що відображає лише динаміку ІТ обробки даних, які моделюють (замішують) означені реальності об'єктів СДС.

Кожна реляційна модель  $G(B, Q)$ , що зберігається в СУТ КМ-ПД, класифікує інформацію на фізичні об'єкти  $S$ , властивості  $P$ , відносини  $R$ , схеми алгоритмів  $A$  і робочі моделі  $M$ . Що в цілому забезпечує відповіді на питання по МЕ-темі. З цією метою семантичний об'єкт або

запис в базі даних забезпечується відповідним S-, P-, R-, A-, M-ознакою. Тоді дуги семантичної мережі будуть конкретно (5 ознак) ідентифікувати тип  $X_i R_k Y_j$  – відношення. Він ідентифікує категорію дії, зв'язку, функції між поняттями  $X_i$  і  $Y_j$  у логічному ланцюзі (ланцюг (рис. 1) адресних посилань між записом  $X_i$  головним і всіма її детальними  $Y_j \forall j \in J$  частками). Для комплексних досліджень і забезпечення якості розрахунків доцільні в СУТ КМ-ПД (рис. 2) знання не тільки про матеріальні S, а й про P-, R-, M-, A- – інтелектуальні об'єкти обізнаності ІАС ПЕВО.

Обсяг допоміжних знань, які оптимізують застосуванням типових моделей і алгоритмічних автоматизованих рішень, істотно менше глобального обсягу Internet базових знань по досліджуваному фізичного об'єкту. Однак такий поділ є умовним. Дійсно моделі і алгоритми доцільні, якщо вони адекватно відображають фізичний об'єкт. Тому з урахуванням взаємозв'язку (рис. 2) потенційна потужність даної організації бази знань КМ-ПД із запропонованими базовими 5-ознаками оцінюється добутком

$$(S \times P \times R \times M \times A)^5. \quad (6)$$

Отже, дана база знань (рис. 1) має достатню різноманітність та задовольняє зазначеним вимогам, на експлуатаційні потоки майбутніх запитів.

Перелік тем (рис. 2) універсальних відношень та властивостей, необхідних для повного опису КСЦМ об'єкта та оточуючого її ЗНОС, обирається в залежності від призначення та цілей застосування ПАК КМ-ПД.

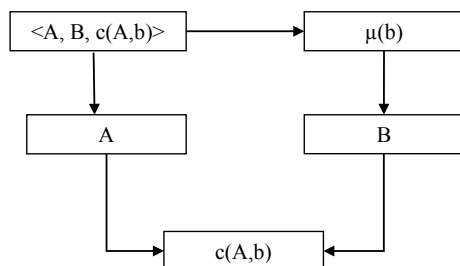
Системою мови універсальних структурно-функціональних конструкцій виду <якщо А (опис явищ та об'єктів) тоді В (опис послідовних дій)> (табл. 2) можуть слугувати відповідні кортежі ПАК КМ-ПД.

Дана багатоцільова система по мірі введення індивідуальної інформації може використовуватись ІАС для відповіді на різноманітні питання користувачів ПЕВО в тому числі самої моделюючої системи КМ-ПД.

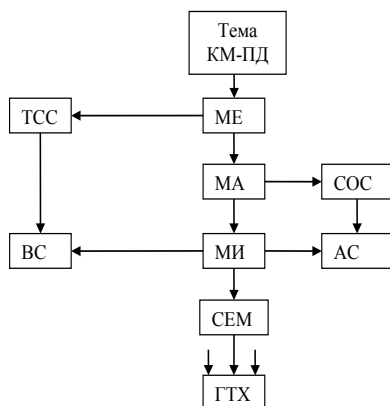
При формуванні ССМ вихідна семантична інформація аналізується згідно наступної семантичної структури опису, яка дає відповідь на питання.

При обробці КСЦМ та асоціативно пов'язаних фрагментів КМ-ПД використовуються різні ситуаційно-ефективні методи, засоби, алгоритми та правила трансформації вихідних даних в семантично вірні (логічно істинні) наслідки.





**Рис. 1. Типова структура взаємозв'язків для організації ланцюгового запису об'єкта у фрагментах файлів банку даних ПАК КМ-ПД**



**Рис. 2. Системна модель бази знань ПАК КМ-ПД**

Символьні кортежі методами причинно-наслідкових залежностей автоматично створюються згідно завдань на основі висновків: по аналогії, ознаці ситуації, структурі наявних знань та відношень. Алгебраїзація кодових зв'язків визначена в пам'яті ПВМ КМ-ПД згідно уніфікованих структур (рис. 1 та 2).

Побудова моделі здійснена виокремленням найбільш характерних, істотних особливостей кожного означеного об'єкта природи. Цільова динамічна взаємодія структур, з різних сторін (6) описують реальну систему відношень за методами моделювання складних динамічних систем. Згідно завдань, це дозволяє формувати адекватні роботи

**Опис парних еквівалентів мови зв'язаного змісту кортежів**

<b>Причинно наслідковий зміст ситуативно-варіаційних описів кортежів у ПЧК</b>	
$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ опис явищ та об'єктів	$B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$ опис послідовних дій
$a_1$ – визначення предмета, кваліфікація (< що називається як> <що – є що>, <що є чим>);	$b_1$ – АКТ дії (Що виконує що);
$a_2$ – приналежність класу ((що ділиться на що), що є частиною чого), (що відноситься до чого));	$b_2$ – причина дії (що зроблено чому, навіщо, для чого);
$a_3$ – мета застосування ((що застосовується де, як, навіщо, чому, для чого));	$b_3$ – визначення результату дії (що стало чим);
$a_4$ – час та умови подій ((коли, дата, ситуація, умови));	$b_4$ – оцінка інформації (що керує чим);
$a_5$ – місцезнаходження ((що де знаходиться), (що де функціонує));	$b_5$ – характеристика функцій (що здійснюється, яким чином);
$a_6$ – склад та будова ((що з чого складається), (що є частиною чого));	$b_6$ – визначення умов (при яких умовах та ситуаціях);
$a_7$ – опис функціонування ((що і як здійснюється));	$b_7$ – умови існування майбутніх подій (що буде чим);
$a_8$ – виникнення та поява ((що де виникає, з чого, як));	$b_8$ – умови, які мали місце в минулому (що було раніше);
$a_9$ – причинно-наслідкові відношення ((що слідує з чого, за рахунок чого));	$b_9$ – характеристика процесів (що виникає з чого і як);
$a_{10}$ – перетворення та зміна (( що в що перетворюється), (що яким стає));	$b_{10}$ – опис змін (що перетворюється у що), (що стає яким);
$a_{11}$ – властивості та характеристики якості (( що чим наділене));	$b_{11}$ – оцінка результату (що сходиться з чим), (що відрізняється від чого);
$a_{12}$ – порівняння та співставлення (( що відрізняється від чого), (що з чим сходиться)).	$b_{12}$ – кваліфікація властивостей (що володіє чим, якою якістю).
$a_n$ – резервна додаткова мітка поняття, що може характеризувати ще специфічні на початку чомусь не зафіксовані сутності реальної природи.	$b_m$ – аналогічно $a_n$ додаткова мітка (групи понять) потребою розвитку

моделі, здійснювати пошук відповідей в рамках конкретної ситуативної задачі за темою діяльності ІАС ПЕВО.

### 8. Висновки

1. Враховуючи відкритість СДС та еволюційний розвиток за етапами (епохами, періодами, кроками) реорганізації їх моделей бази КМ-ПД забезпечують відповідні соціокомунікативні формотворення й зміни (коригування, уточнення) атрибутів та параметрів, включаючи необхідні інфологічні моделі.

2. Глобальні планетарні проблеми безпеки життя ноосфери, флори, фауни для всіх представників біорізноманіття раніше «нормальних» екологічно «чистих» природних систем набувають все більш загрозливі форми. Соціалізна комунікація повинна знати конструктивні техніко-технологічні рішення для повсякденних цілеспрямованих дій, що також ретельно й за багатьма критеріями моделюємо, оцінюємо, розподіляємо закони управління у просторово-часових континуумах планети.

3. Парниковий ефект запущено всіма галузями людської діяльності у сучасних ринкових відношеннях її глобалізації. Висновок лише один, треба негайно активізувати соціальний інтелект, щоб починати утилізацію накопичених запасів забруднень з вуглецево-органічними чисельними речовинами.

### Список літератури:

1. Баранов Г.Л., Мнацаканян М.С., Комісаренко О.С. Моделювання процесів МІТС зі змінними ситуаціями у часі та просторі. *Polish journal of science*. 2018. Vol. 1. No. 12. P. 30–38.
2. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Процесні інфологічні моделі в задачах гетерогенної взаємодії складних динамічних систем та нестационарного середовища. *Вісник Національного транспортного університету*. 2019. Вип. 1(40). С. 3–12.
3. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Технологія інтеграції гетерогенних процесів моделювання формотворення матеріалів для майбутніх транспортних систем. *Вісник Національного транспортного університету*. 2018. Вип. 1(39). С. 24–33.
4. Кравчук В.І., Баранов Г.Л., Прохоренко О.М., Комісаренко О.С. Інформатизація агропромислового комплексу із застосуванням розгалужених сервісів: стан і перспективи розвитку. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України* : Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ. 2018. Вип. 24(38). С. 202–213.

5. Кравчук В.І., Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Ергатичне випробування у просторі та часі комплексних техніко-технологічних рішень керованого землеробства. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України* : Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ. 2018. Вип. 23(37). С. 14–27.

6. Кравчук В.І., Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Інформаційна технологія прогнозування та випробування майбутньої аграрної техніки. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України* : Зб. наук. пр. УкрНДІПВТ. 2018. Вип. 22(36). С. 27–35.

7. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С., Чака О.Г. Інфологічне моделювання технологій створення матеріалів для футурологічних конструкцій та систем. *Метрологія та прилади*. 2018. № 6(74). С. 53–58.

8. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Методологічні основи моделювання процесів формотворення інноваційних матеріалів аерокосмічної технології. *Аерокосмічні технології*. 2017. Вип. 2(02). С. 5–11.

9. Комісаренко О.С. Результати взаємодії в системі В4С-Hf при різних термодинамічних умовах. *The scientific heritage*. 2017. № 12(12). Р. 2. Р. 107–117.

10. Комісаренко О.С., Макаров В.О. Питання інтеграції гетерогенних процесів для майбутніх транспортних систем. *Управління проектами, системний аналіз та логістика. Серія: «Технічні науки»*. 2017. Вип. 20(41). Ч. 1. С. 50–57.

11. Баранов Г.Л., Комісаренко О.С. Інфологічне моделювання складних процесів формотворення нових речовин. *Моделювання та інформаційні технології* : зб. наук. пр. Нац. акад. наук України, Ін-т пробл. моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. 2018. № 85. С. 12–22.

### References:

1. Baranov H.L., Mnatsakanian M.S., Komisarenko O.S. (2018). Modeliuvannia protsesiv MITS zi zminnymy sytuatsiamy u chasi ta prostori [Modeling of MITS processes with changing situations in time and space]. *Polish journal of science*. Vol. 1. No. 12. P. 30–38.

2. Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2019). Procesni infologichni modeli v zadachax geterogennoyi vzayemodiyi skladnykh dynamichnykh system ta nestacionarnogo seredovyshha [Process infological models in problems of heterogeneous interaction of complex dynamic systems and non-stationary environment]. *Visnyk Nacionalnogo transportnogo universytetu*. Vyp. 1(40). S. 3–12.

3. Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2018). Teknologiya integratsiyi geterogennykh procesiv modelyuvannya formotvorenniya materialiv dlya majbutnix transportnykh system [Technology of integration of heterogeneous modeling of materials formation for future transport systems]. *Visnyk Nacionalnogo transportnogo universytetu*. Vyp. 1(39). S. 24–33.

4. Kravchuk V.I., Baranov G.L., Proxorenko O.M., Komisarenko O.S. (2018). Informatyzatsiya agropromyslovogo kompleksu iz zastosuvannyam rozgaluzhenykh servisiv: stan i perspektyvy rozvytku. [Informatization of agro-industrial complex

with the use of branched services: state and prospects of development]. *Texniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi teknyky i tekhnologij dlya silskogo gospodarstva Ukrainy*: Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT. Vyp. 24(38). S. 202–213.

5. Kravchuk V.I., Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2018). Ergatychnye vyprobuvannya u prostori ta chasi kompleksnykh teknyko-tekhnologichnykh rishen kerovanogo zemlerobstva [Ergatic testing in space and time of complex technical and technological solutions of managed agriculture]. *Texniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi teknyky i tekhnologij dlya silskogo gospodarstva Ukrainy*: Zb. nauk. pr. UkrNDIPVT. Vyp. 23(37). S. 14–27.

6. Kravchuk V.I., Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2018). Informacijna tekhnologiya prognozuvannya ta vyprobuvannya majbutnoyi agrarnoyi teknyky [Information technology of forecasting and testing of future agrarian technology]. *Texniko-tekhnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi teknyky i tekhnologij dlya silskogo gospodarstva Ukrainy*: Zb. Nauk pr. UkrNDIPVT. Vyp. 22(36). S. 27–35.

7. Baranov G.L., Komisarenko O.S., Chaka O.G. (2018). Infologichne modelyuvannya tekhnologij stvorenniya materialiv dlya futorologichnykh konstrukcij ta system [Infological modeling of materials creation technologies for futurological structures and systems]. *Metrologiya ta prylady*. № 6(74). S. 53–58.

8. Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2017). Metodologichni osnovy modelyuvannya procesiv formotvorenniya innovacijnykh materialiv aerokosmichnoyi tekhnologiyi [Methodological bases of modeling of formation processes of innovative materials of aerospace technology]. *Aerokosmichni tekhnologiyi*. Vyp. 2(02). S. 5–11.

9. Komisarenko O.S. (2017). Rezultaty vzayemodiyi v systemi B4C-Hf pry riznykh termodynamichnykh umovax [The results of the interaction in the B4C-Hf system under different thermodynamic conditions]. *The scientific heritage*. № 12(12). P. 2. P. 107–117.

10. Komisarenko O.S., Makarov V.O. (2017). Pytannya integraciyi geterogennykh procesiv dlya majbutnix transportnykh system [The issue of integrating heterogeneous processes for future transportation systems]. *Upravlinnya proektamy, systemnyy analiz ta logistyka. Seriya: «Texnichni nauky»*. Vyp. 20(41). Ch. 1. S. 50–57.

11. Baranov G.L., Komisarenko O.S. (2018). Infologichne modelyuvannya skladnykh procesiv formotvorenniya novykh rehovyn [Infological modeling of complex processes of formation of new substances]. *Modelyuvannya ta informacijni tekhnologiyi*: zb. nauk. pr. Nacz. akad. nauk Ukrainy, In-t probl. modelyuvannya v energetycki im. G.Ye. Puxova. № 85. S. 12–22.

## SOLVING TASKS OF VESSEL COLLISION AVOIDANCE AND MANEUVERING DURING DESIGNING DECISION SUPPORT SYSTEMS OF THE NAVIGATOR

### ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ РОЗХОДЖЕННЯ ТА МАНЕВРУВАННЯ СУДНА ПРИ СТВОРЕННІ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДІЯ

Andrii Ben<sup>1</sup>

Ihor Palamarchuk<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-51>

**Abstract.** *Purpose.* The purpose of the work is to develop the latest conceptual approaches to the creation of decision support systems of the navigator, to determine the theoretical and methodological foundations for the construction of such systems and priority ways of their practical implementation, which will improve navigation safety. *Method.* In the application plan, this work is aimed at creating a software product, the application of which will allow to solve an important scientific and applied task in the field of application of information technology in navigation – improving the safety of ship management through the introduction of decision support systems of the navigator using artificial intelligence methods, in particular scenario-based approach to building a knowledge base of decision support systems for modeling interaction processes. *Object.* The object of the research is the decision-making processes in navigation. The peculiarity of decision-making in navigation is the need to form and make decisions in real-time, provided there is a complex cooperative interaction between the participants of the navigational situation and the availability of constant information exchange of the navigator with the technical means of ship management. *Subject.* The subject of the research is the newest conceptual approaches to the creation of decision support systems in navigation,

---

<sup>1</sup> Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Vice-rector of Research,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine

<sup>2</sup> Postgraduate Student,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine

theoretical and methodological bases for the construction of such systems, taking into account the features of the movement of ships, the process of human interaction with the technical means of navigation and the requirements of International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREG-72). *Practical importance.* During the research it was determined that in the conditions of introduction of modern information technologies in navigation and the concept of e-Navigation, the most important component of improving the safety of current navigation is the creation of decision support systems of the navigator. When creating such systems, it should be considered that the most important factor in the accidents of current navigation is the so-called "human factor", so when creating decision support systems of the navigator, special attention should be paid to the processes of interaction of the navigator with the technical means of navigation and by reducing the impact of "human factor" on ship management processes. *Scientific novelty.* It is shown that the perspective direction of the development of decision support system of the navigator is the application of artificial intelligence methods, in particular scenario-based approach to building the knowledge base of decision support systems for modeling interaction processes. In modern conditions the implementation of decision support systems of the navigator is capable to reduce substantially accidents at current navigation, first of all by increase of efficiency of functioning of ergatic system "man – technical means of navigation" and comprehensive introduction of achievements of modern information technologies in processes of ship management. *Results.* Theoretical and methodological principles of construction of the decision support system of the navigator have been developed, taking into account the peculiarities of the motion of vessels, the process of human interaction with the technical means of navigation, and the requirements of the COLREG-72. Created decision support system of the navigator has advantages over existing analogues, as it allows to simultaneously solving the problems of passage and maneuvering of ships.

### 1. Вступ

Розвиток сучасного судноплавства нерозривно пов'язаний із широким впровадженням нових інформаційних технологій, стрімким розвитком засобів супутникової навігації та електронних картографічних інформаційних та навігаційних систем. Існуючі на сьогодні розробки

в галузі створення інформаційних систем управління рухом суден спрямовані в основному на розрахунок безпечних зон руху і не враховують впливу так званого «людського чинника» на процеси сприйняття інформації судноводієм, формування та прийняття ним рішень, а також загальної взаємодії всіх учасників навігаційної ситуації.

Як показує аналіз причин виникнення аварій на морі, головним їх фактором є і залишається, так званий, людський фактор (близько 85% усіх випадків) – більшість навігаційних аварій відбувається не через відмову технічних засобів навігації або управління рухом судна, а через неготовність судноводіїв своєчасно приймати рішення відповідно до ситуації, яка складається [1, с. 17; 2, с. 171]. Зниження впливу людського фактору на рівень аварійності на морі є актуальною науково-практичною проблемою сьогодення, яку необхідно вирішувати в розрізі оптимізації взаємодії судноводія з сучасними технічними засобами.

Іншою важливою проблемою сьогодення є підвищення точності дотримання суднами планованої траєкторії руху, що обумовлено потребою подальшої розробки ресурсів континентального шельфу в зв'язку із необхідністю забезпечення енергетичної безпеки України.

Таким чином на поточний момент існує нагальна проблема в створенні сучасних систем підтримки прийняття рішень (СППР) з управління рухом суден, що враховують особливості процесу взаємодії людини з технічними засобами судноводіння та забезпечують прийняття нею рішень в складних навігаційних умовах та критичних ситуаціях, які здатні ефективно вирішувати значну частку питань, пов'язаних із процесами формування рішень з управління судном та зниженням впливу «людського фактору». Створення та застосування систем підтримки прийняття рішень в судноводінні набуває особливого значення в умовах інтенсивного впровадження сучасних інформаційних технологій та концепції e-navigation [3, с. 8].

## **2. Людський елемент як фактор до створення СППР**

З точки зору науки «судноводіння – єдиний процес, що забезпечує плавання і керування судном для досягнення поставленої мети». Відомо, що мета торговельного, промислового, наукового та військового мореплавства різна. Однак вимоги до забезпечення безпеки мореплавства єдині, а спільне завдання судноводіння універсальне. Навіга-



ційна безпека плавання – невід’ємна умова вирішення будь-якої задачі мореплавання, а спільне завдання судноводіння стисло формулюється так «провести судно з одного пункту в інший за заздалегідь наміченим, безпечним і найвигіднішим шляхом».

З метою подолання негативного впливу людського фактора і запобігання можливих наслідків людських помилок в судноводінні, необхідно проводити послідовну політику вдосконалення механізмів і пристроїв, створювати в рамках інтелектуальних систем управління (ІСУ) системи штучного інтелекту, орієнтовані на вирішення завдань контролю, оцінки ситуації, прийняття рішень і управління конкретними судовими об’єктами, системами і пристроями.

Значною перешкодою на шляху розв’язання цього питання стає відсутність чітких формальних моделей, які характеризують процеси взаємодії суден при розходженні. Особливо це стосується ситуації невідомості, зокрема, коли наявні два та більше суден, а умови огляду водної акваторії є недостатніми. Ключовим фактором правильного рішення такої задачі є забезпечення ефективності рішень управління судном, що приймаються судноводієм. Так, чим складнішими становляться функції судноводія, тим гостріше встає необхідність у координації роботи технічних засобів та інтерпретації інформації, яка надається з їх боку судноводію.

Слід зазначити, що розробка СППР судноводія пов’язана з низкою складнощів, одна з яких – формалізація Міжнародних правил попередження зіткнення суден 1972 року (МППЗС-72) у вигляді, зручному для практичного використання в базі знань СППР.

### **3. Вимоги до створення СППР судноводія**

Наявний досвід створення СППР в судноводінні дозволяє зробити висновок, що їх ефективне практичне використання можливо тільки в разі дотримання ряду важливих вимог, обумовлених, з одного боку, особливостями функціонування безпосередньо СППР, а з іншого – процесами прийняття рішень в судноводінні.

Робота СППР в режимі реального часу, накладає жорсткі часові обмеження на процеси розробки та прийняття рішень і вимагає побудову сценаріїв розходження суден на весь період взаємодії. Зазначені обставини зумовлюють необхідність розробки математичних моделей,

адекватних вимогам МППЗС-72 та придатних для опису ситуацій взаємодії суден при розходженні та прийнятті рішень з управлінням судном в реальному часі.

Аналіз процесів прийняття рішень судноводієм, дозволив нам виявити п'ять базових принципів, які використовуються ним на практиці:

- увага судноводія концентрується переважно не на варіантах рішення задачі розходження, а на умовах протікання процесу управління судном, які він аналізує, спираючись на свій досвід практичної діяльності;

- за сприятливих умов (невелика кількість об'єктів, добра видимість, відсутність втоми) судноводій здатний самостійно долати фактори неточності і невизначеності опису навігаційної ситуації і оперативно приймати правильне рішення на основі наявного досвіду;

- при несприятливих умовах, наявності зовнішніх впливів, втоми, судноводій вирішує завдання розходження на основі найбільш значущих, з його точки зору, факторів і системи узагальнених оцінок, не беручи до уваги багато «несуттєвих» деталей;

- аналізуючи інформацію про навігаційну ситуацію в зоні маневрування, судноводій підсвідомо оцінює динаміку навігаційних параметрів, екстраполюючи їх очікувану зміну в часі і формуючи єдину модель її подальшого розвитку;

- в складних умовах судноводій постійно оцінює не лише динаміку розвитку подій, але й імовірність досягнення поставленої мети, яка виявляється у вигляді емоційного відчуття успіху або тривоги.

Зазначені обставини зумовлюють виникнення «людського фактора» як однієї з основних причин аварійності в судноводінні. Необхідність мінімізації його впливу шляхом використання СППР судноводія, дозволяє сформулювати основні вимоги до СППР:

- робота СППР в режимі реального часу та її інтеграція за наявними на судні системами управління рухом;

- необхідність врахування всіх вимог МППЗС-72;

- необхідність графічного представлення сформованої ситуації, з візуальними позначками меж зони безпеки власного судна і динаміки їх змін;

- необхідність аналізу під час прийняття рішень декількох можливих сценаріїв розходження, обумовлених цілеспрямованою поведінкою суден-цілей під час їх руху;

- необхідність врахування впливу зовнішніх умов у зоні маневрування, зокрема гідрометеорологічних, гідрографічних факторів і навігаційних небезпек;

- врахування попереднього досвіду управління рухом судна в аналогічних умовах, якщо він мав місце.

Під час наукового дослідження також були визначені базові вимоги до моделей і алгоритмів, що застосовані під час розробки СППР судноводія:

- рух кожного з суден-учасників навігаційної ситуації розглядається з позиції цілеспрямованої поведінки, що має на меті уникнення зіткнень з іншими суднами, максимально дотримуючись при цьому вимог МППЗС-72;

- для аналізу процесу розвитку навігаційної ситуації необхідно будувати багатокрокові сценарії її розвитку, приймаючи до уваги динамічні моделі поведінки суден-учасників руху;

- слід враховувати, що реальний процес розходження суден проходить в умовах складної взаємодії учасників у випадку, якщо їх число більше двох, а умови видимості відрізняються від добрих;

- кількість можливих сценаріїв розвитку навігаційних ситуацій, які аналізуються СППР достатньо велика, і їх число необхідно скорочувати, виходячи як з обмежень МППЗС-72, так і динаміки змін ключових параметрів руху суден (ліній відносного руху (ЛВР), пеленгів і швидкостей).

- необхідно враховувати і накопичувати в СППР інформацію щодо попереднього досвіду управління рухом судна в аналогічних умовах, якщо такий мав місце.

#### **4. Застосування МППЗС-72 в СППР судноводія**

МППЗС-72 є основним нормативним документом, що регламентує процеси розходження суден, і їх формалізацію у вигляді, придатному для використання в СППР судноводія та є актуальною науковою і практичною задачею. Істотним недоліком МППЗС-72 є те, що правила регламентують дії судноводія тільки для випадків бінарної взаємодії і не розглядають ситуації одночасного розходження декількох суден. Крім того, правила самі по собі є джерелом невизначеності в описі ситуації розходження зважаючи на неоднозначність трактування деяких приписів.

Оскільки МППЗС-72 регламентують попарну взаємодію суден, при формуванні сценаріїв розвитку поточної ситуації в СППР доцільно розглядати саме такий вид взаємодії, приймаючи, однак, при цьому до уваги той факт, що судна взаємодіють не тільки з власним судном, але й один з одним. Вибір пар суден, взаємодія яких аналізується СППР і для яких формуються сценарії, здійснюється відповідно рівня їх небезпеки один для одного. Очевидно, що число розглянутих взаємодіючих пар суден для випадку суден у зоні розходження буде дорівнювати числу сполучень  $C_N^2$ :

$$C_N^2 = \frac{N!}{(N-2)!2!} \quad (1)$$

Ця величина на практиці вкрай рідко перевищує значення 190 (що відповідає 20-ти суднам в зоні розходження), а, для більшості розглянутих ситуацій, знаходиться в діапазоні (2–7 взаємодіючих суден відповідно). Зазначений порядок величини  $C_N^2$  хоча й унеможливорює «програвання» всіх можливих варіантів взаємодій безпосередньо зусиллями судоводія, як це зазначається в роботі [4, с. 70], тим не менш, не є перешкодою для здійснення такої операції сучасними засобами обчислювальної техніки в режимі реального часу, враховуючи ту обставину, що реальне значення величини  $C_N^2$  може бути додатково суттєво зменшено шляхом введення попередньої класифікації суден за ступенем їх небезпеки один для одного. Оцінка навігаційної ситуації в СППР і побудова можливих сценаріїв її подальшого розвитку здійснюється шляхом формування та аналізу логічних правил, представлених у вигляді фрейм-структур.

Загальний алгоритм роботи СППР щодо запобігання зіткнень суден має наступний вигляд (рис. 1).

- ідентифікація суден, що знаходяться в зоні можливого зіткнення;
- моніторинг параметрів руху суден та динаміки їх зміни;
- оцінка похибки одержуваних параметрів руху;
- класифікація суден за ступенем небезпеки;
- визначення пар взаємодіючих суден, для яких формуються можливі сценарії руху;
- визначення областей взаємних обов'язків у відповідності із МППЗС-72 і меж зони безпеки власного судна;
- формування множини можливих сценаріїв (стратегій) руху суден;

- визначення стратегій руху, що відповідають заданим критеріям безпеки;
- вироблення можливих альтернатив з управління судном і надання їх судноводію.

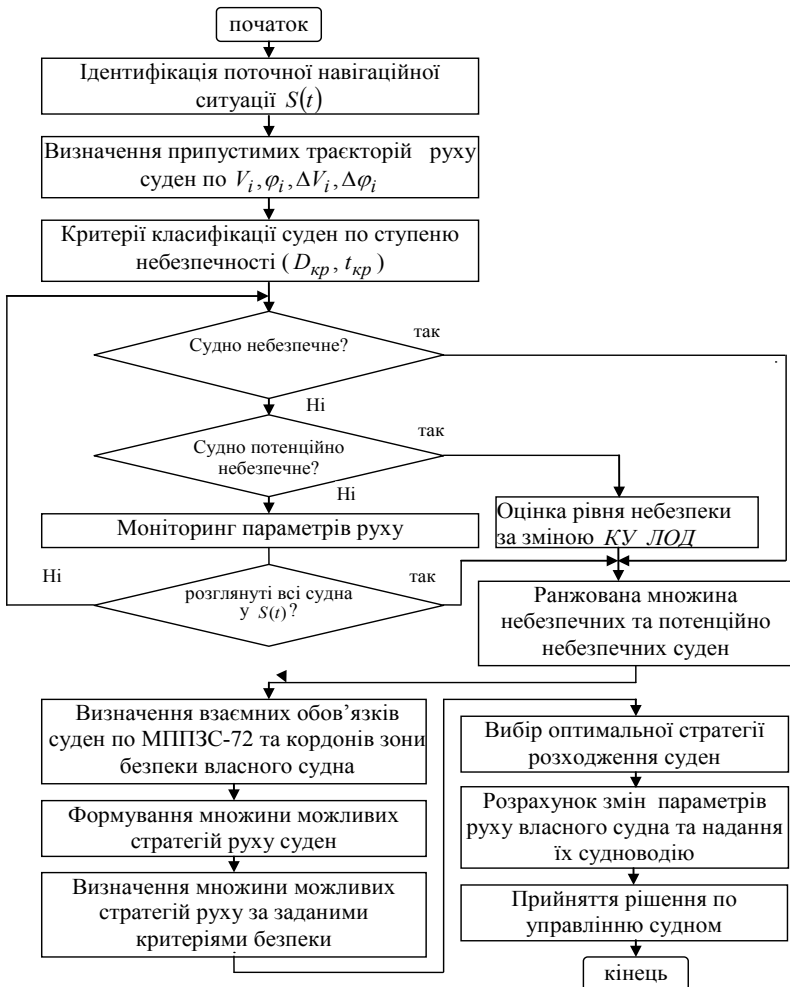


Рис. 1. Алгоритм роботи СППР судноводія

Судно вилучається із розгляду СППР у випадку ідентифікації його як безпечного, але моніторинг параметрів руху триває при перебуванні його в межах зони дії радіолокаційної системи (РЛС) та засобів автоматизованої радіолокаційної прокладки (ЗАРП). Для небезпечних і потенційно небезпечних суден СППР формує багатокрокову стратегію розходження на весь прогнозований період їх перебування в зоні взаємних обов'язків, з подальшою корекцією стратегії у випадку, якщо поточний розвиток ситуації буде відрізнитися від прогнозованого.

Для небезпечних і потенційно небезпечних суден СППР формує багатокрокову стратегію розходження на весь прогнозований період їхнього перебування у зоні взаємних обов'язків, із подальшою корекцією стратегії у випадку, якщо поточний розвиток ситуації буде відрізнитися від прогнозованого. У процесі формування стратегії розходження враховується передбачувана зміна параметрів руху суден, обумовлена їх взаємодією один з одним відповідно до МППЗС-72.

### **5. База даних (БД) СППР судноводія**

Створення СППР судноводія потребує розробки відповідних моделей та методів накопичення і обробки навігаційних даних.

Використання класичних методів штучного інтелекту ускладнюється тим, що більшість з них або жорстко детерміновані і не дозволяють якісно вирішити завдання за наявності суперечливості чи неповноти вихідних даних (продукційні системи, теорія ігор, семантичні мережі) або не забезпечують достатньої надійності одержуваного рішення (нечітка логіка, нейронні мережі, байєсовські мережі), або мають високу складність практичної реалізації і не задовольняють тимчасовим обмеженням (генетичні алгоритми, переборні методи, методи евристичного пошуку). Зазначені обставини, а також необхідність застосування досить простих у практичній реалізації механізмів самонавчання СППР, зумовили доцільність використання прецедентних (CBR або Case-Based Reasoning) методів. CBR, або метод міркування на основі прецедентів, є одним з напрямків у дослідженнях зі штучного інтелекту, що інтенсивно розвиваються [5, с. 494].

Найбільш складним етапом роботи прецедентної СППР є етап класифікації поточної ситуації. В якості методу, за допомогою якого здійснюється обчислення заходів подібності прецедентів, використовується

метод пошуку найближчого сусіда, в основі якого лежить спосіб вимірювання ступеню збігу значень атрибутів, які визначають прецедент.

Атрибутами є тип маневру і параметри руху судна. Як тільки поточна ситуація ідентифікована, судноводій може прийняти рішення із запропонованих системою альтернатив на основі вже наявних (збережених) прецедентів, або самостійно. Вибір найбільш відповідного конкретній ситуації прецеденту, дозволяє сформувати на його основі рішення в готовому вигляді, або вимагає проведення додаткових дій з адаптації рішення з метою врахування відмінностей у характеристиках сформованої і базової ситуації. Якщо відповідний прецедент невиявлений або процес адаптації вимагає залучення додаткової інформації, прийняття рішення потребує звернення до бази знань СППР, що містить основні відомості про предметну область і застосування для прийняття рішення згідно особистого досвіду судноводія. В останньому випадку відбувається формування нового прецеденту, який зберігається в СППР. Ситуація, для якої був збережений прецедент, надалі вважається опорною або базовою.

Процес функціонування прецедентної СППР можна представити у вигляді CBR-циклу (рис. 2), що складається з чотирьох основних фаз:

- 1) отримання (вибір) з БД СППР найбільш доречного прецеденту чи множини прецедентів, на основі заданого відношення подоби;
- 2) використання обраних прецедентів для прийняття рішення;
- 3) перегляд і корекція (адаптація), які у разі необхідності приймаються раніше, в обраних прецедентах рішень;
- 4) збереження в БД прийнятого рішення і сформованої ситуації в якості нового прецеденту чи відповідна зміна обраного прецеденту, що може бути корисним в подальшому при вирішенні аналогічних завдань.

Головною особливістю CBR-циклу є те, що його застосовують при безпосередній взаємодії з особою, яка приймає рішення, що забезпечує процес самонавчання СППР.

Оскільки СППР судноводія функціонує в режимі реального часу, це накладає жорсткі часові обмеження на процеси вироблення та прийняття рішень і вимагає побудови сценаріїв розходження суден на весь період взаємодії. Аналіз низки зарубіжних та вітчизняних робіт, присвячених теорії і практиці створення СППР в судноводінні [6, с. 140; 7, с. 41], показує, що найважливішим чинником, який необхідно врахо-

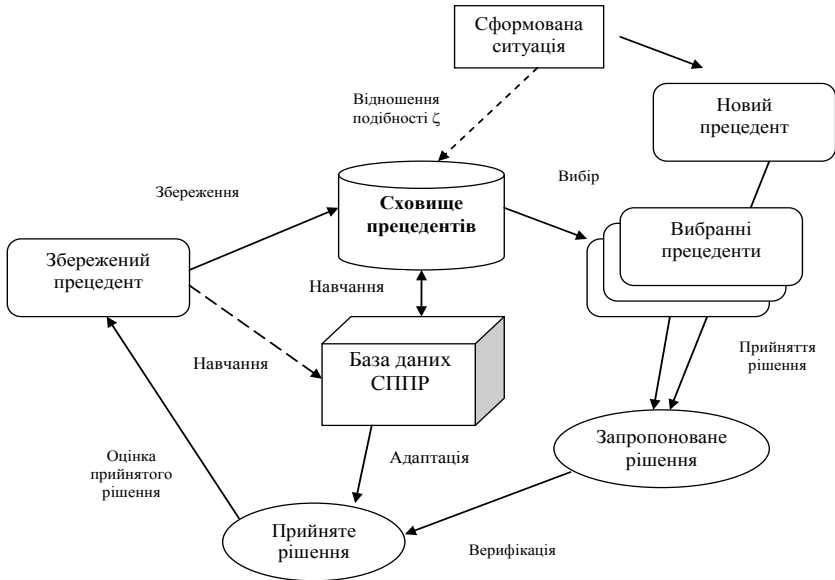


Рис. 2. Фази CBR-циклу

увати при описі процесу розходження суден, є характер їх взаємодії. При цьому необхідно враховувати принцип спільності інтересів взаємодіючих суден, що складається в уникненні зіткнення і нормативну координацію їх поведінки відповідно МППЗС-72.

Застосування запропонованого підходу до формалізації правил МППЗС-72 дозволило реалізувати в СППР імітаційну модель розходження суден, що враховує вимоги МППЗС-72 і логіку дій судноводіїв.

Для подальшого уточнення сценаріїв розвитку навігаційних ситуацій в СППР здійснюється оцінка параметрів руху суден, на підставі якого відбувається прогнозування можливих траєкторій їх руху з метою обмеження кількості можливих сценаріїв розходження, що підлягають аналізу.

## 6. Підтримка прийняття рішень при розходженні суден

Для надійної роботи СППР судноводія перш за все необхідно зменшити кількість інформації, яка повинна бути прийнята до обробки. При розходженні двох суден існує 288 ситуацій розходження і видів



маневрування. При 20 суднах число ситуацій і маневрів взаємного розходження становить 54720 [8, с. 68]. Таку велику кількість інформації судноводій не може обробити, і йому потрібна допомога в підтримці принципового рішення по маневруванню, що формує СППР.

Спочатку наявна навігаційна ситуація підлягає обробці в модулі ситуаційного аналізу, який за даними автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) розраховує відстань до всіх суден у вигляді матриці, і відкидає з подальшої обробки ті, відстань до яких збільшується. Як показує виконаний нами аналіз, в більшості випадків число таких суден досягає 50%.

Другим кроком є аналіз характеру зміни відносного руху за трьома факторами:

- розташування інших суден щодо діаметральної площині власного – праворуч або ліворуч;
- величиною кута між ЛВР і діаметральною площиною свого судна, курсового кута ЛВР –  $\alpha < 90^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha > 90^\circ$ ;
- відносним курсом між лінією діаметральної площині власного та іншого судна,  $P < 90^\circ$ ,  $P = 90^\circ$ ,  $P > 90^\circ$ , – перетинає курс по носу, проходить через нас або перетинає лінію курсу по кормі.

На підставі аналізу існуючих залежностей був розроблений аналізатор ситуації зближення, аналізатори вибору виду маневру і розрахункові схеми визначення часу і відстані до інших суден, в момент початку маневрування власного.

Він складається з блоку розрахунку відстані до всіх суден, які постійні за даними АІС, визначає дистанцію і формує матрицю дистанцій. Позначимо кількість спостережуваних суден через  $n$ . Параметри, виміряні від власного судна на інші, будемо позначати індексом нуль і цифрою, яка позначає інше судно в межах  $i \in [1, n]$ , а між суднами, що спостерігаються – індексом з двома цифрами, першою з яких вимірюється пеленг і дистанція, а другою – на яке судно. Таким чином можна аналізувати і оцінювати ситуацію зближення між суднами в берегових системах.

СППР аналізує різницю подальшої і попередньої дистанції через інтервал часу  $1 \div 3$  с. Якщо  $D(t_{i+1}) - D(t_i) > 0$  то таке судно знімається з подальшої обробки, зберігаючи аналіз дистанції в подальшому.

Важливою функцією СППР є підтримка прийняття рішень судноводія при надмірному, небезпечному та аварійному зближенню суден і вибору маневру власного судна в цих випадках.

Для вирішення зазначеної задачі були розроблені розрахункові схеми і алгоритми, які містять вперше запропоновані способи і методи функціонування системи управління судном і контролю над процесом переміщення та зближення, включаючи оцінку надмірного і небезпечного зближення, а також вибір маневру для попередження аварійної ситуації на підставі даних АІС.

Для вирішення завдання введемо дві аксіоми, які очевидні і не вимагають доказів:

Аксіома 1. Якщо існує ймовірність зіткнення, то ці цілі небезпечні і виконується умова  $(d\P/dt) = 0$ ,  $(dD/dt) < 0$ . (курс не змінюється, дистанція зменшується).

Аксіома 2. Оптимальним курсом відвороту для попередження зіткнення є паралельний або контркурс небезпечного судна.

Алгоритм вибору виду маневру полягає у розрахунку відстані між суднами і часі настання ситуації останнього моменту з урахуванням геометрії зближення, параметрів руху цілей і власного судна, його маневрених характеристик і цілей для всіх альтернатив виконання і тієї, яка настає останньою. Момент надмірного зближення вважати- мемо, коли спочатку у розпорядженні судноводія є три можливості попередити зіткнення: гальмування заднім повним ходом; перекладанням керма вліво або вправо на борт. При цьому будемо вважати «маневром останнього моменту» той, який настане останнім.

Науково-методологічні основи підготовки інформації для команди містка про критичні й аварійні ситуації і представлення її визначено модельним курсом ІМО 1.22 «Судновий тренажер і робота в колективі містка» [9, с. 7], що дозволяє завчасно прийняти рішення для його попередження. Однак зазначений модельний курс не містить алгоритмів і програм організації містка при виникненні аварійної ситуації. Крім того в ньому не міститься обґрунтування ефективних способів формування стійкого навичку оператора судна.

Обчислення за кожною розрахунковою схемою для заданої ситуації зближення закінчуються візуалізацією часу і дистанції до небезпечного судна в момент надмірного, небезпечного і аварійного зближення. При цьому інформація про аварійне зближення є передісторією аварійної ситуації.

Аналізатор визначає розрахункову схему зближення, формує її візуалізацію і виконує розрахунок відстані до небезпечного судна і часу

віддачі відповідної команди з управління власним судном для попередження аварійного зближення.

При цьому завжди першою настає ситуація надмірного зближення, коли у розпорядженні судноводія є ще дві альтернативи попередження зіткнення. Наступною є ситуація небезпечного зближення, коли в розпорядженні судноводія є ще один маневр. При настанні третьої – останньої можливості попередити зіткнення, настає ситуація аварійного зближення, в модулі візуалізації СППР судноводія видається рекомендація про вид маневру і спрацьовує звукова сигналізація. Якщо судноводій пропустив цей момент, то необхідно виконувати маневр останнього моменту і дати машині команду працювати заднім повним ходом, для зменшення пошкоджень при зіткненні.

Запропонована нами модель уникнення зіткнень суден відрізняється від існуючих [10, с. 71] тим, що містить спосіб визначення меж надмірним, небезпечним або аварійним зближенням суден в СППР судноводія та забезпечує вибір режимів розходження суден в залежності від навігаційної ситуації, що склалася.

### **7. Розробка прототипу СППР судноводія**

Розроблена СППР судноводія включає в себе окремі програмні модулі, що забезпечують вирішення задач розходження та маневрування судна відповідно.

Програмний модуль «Trajectory» здійснює пошук безпечної траєкторії руху з урахуванням низки факторів: кількість зустрічних суден, що спостерігаються на поточний момент часу, наявність серед них небезпечних, властивостей руху власного судна, параметрів руху небезпечних суден, їх відносного розміщення відносно власного судна, правил маневрування для запобігання зіткнення.

Модуль забезпечує можливість введення параметрів руху власного судна, та параметрів навігаційної ситуації (дистанції до інших суден, їх швидкості та курси, тип видимості, час між вимірами параметрів руху інших суден, розмір «безпечної зони» судна (рис. 3).

Під час функціонування модулю здійснюється виведення правил попередження зіткнень МППЗС-72 за якими класифіковано навколишні судна та відбувалося маневрування, а також рекомендованої зміни курсу для запобігання зіткнення (рис. 4).

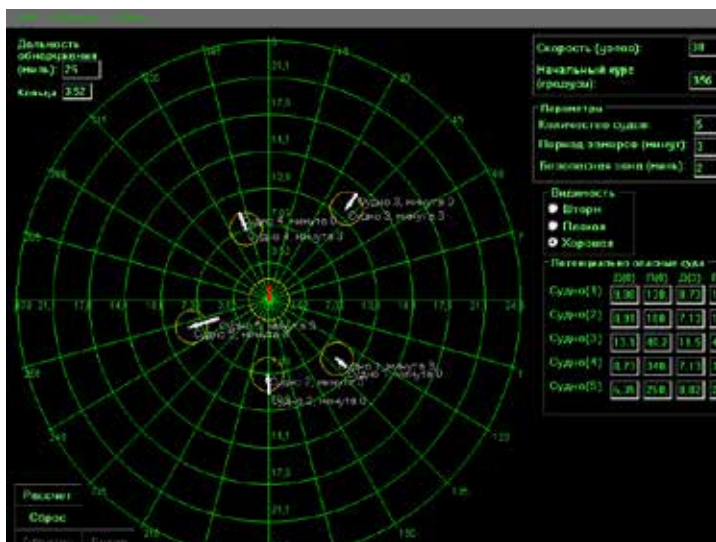


Рис. 3. Приклад аналізу навігаційної ситуації при розходженні 5-ти суден

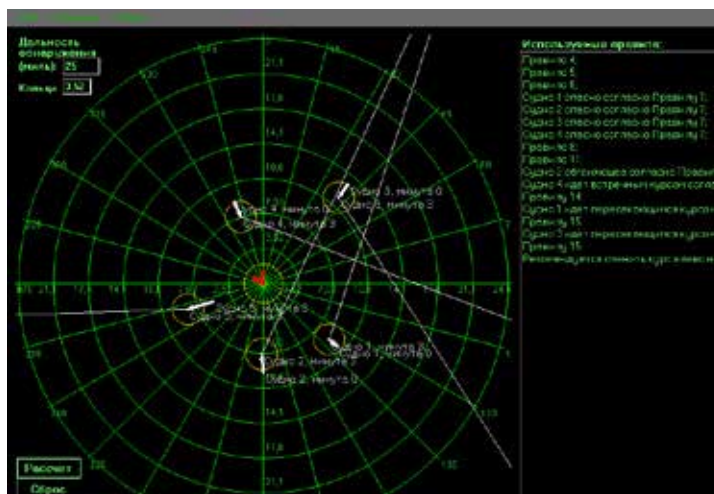


Рис. 4. Визначення СППР правил МППЗС-72, що регламентують процес розходження суден в навігаційній ситуації, що склалася

Також здійснюється виведення візуальної інформації про маневрування суден, вектори їх курсів, графічне відображення безпечних зон власного судна та суден-цілей, їх параметри руху, та передбачувану навігаційну ситуацію, яка буде після розходження (рис. 5, 6).

Після прийняття судноводієм рішення з управління судном, прийняте рішення та поточна навігаційна ситуація зберігаються в БД СППР судноводія та можуть бути використані в майбутньому при виникненні аналогічних ситуацій з управління рухом судна.

Програмний модуль «Поворот» призначений для розрахунку полюсу повороту судна при маневруванні у вузькостях та обмеженому навігаційному просторі.

Під час розрахунків ПП СППР враховує технічні характеристики конкретного судна та навігаційні умови проведення маневрування (рисунок 7).

Тестування СППР судноводія здійснювалося в Херсонській державній морській академії із застосуванням комплексу тренажерного

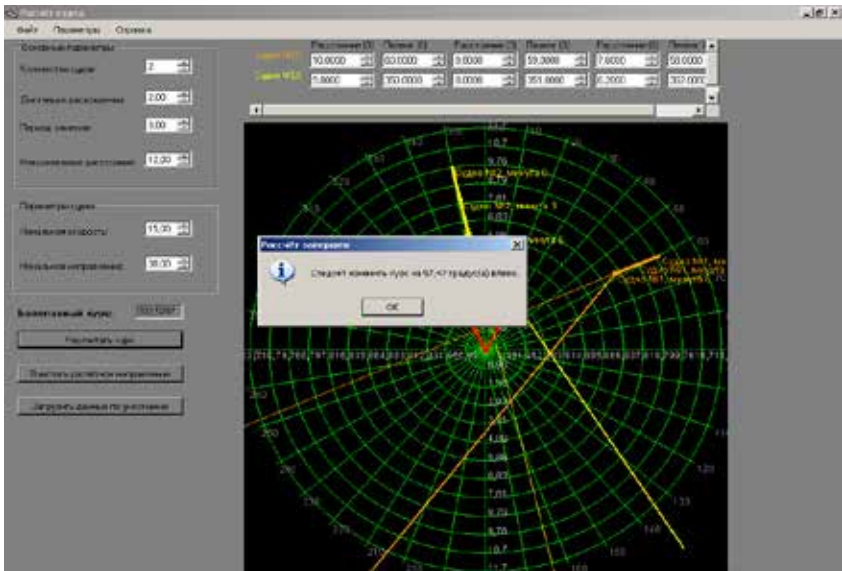


Рис. 5. Формування рекомендації СППР судноводію

Просмотр / изменение данных судна

Название судна: ДШОА-001

Длина между вертикальными шпангоутами, м: 127.0

Ширина наибольшая, м: 17.0

**Данные по составным судна**

В балласте

Осадка носом, м: 5.70 5.70

Осадка кормой, м: 5.26 5.26

Коэффициент плотности воды: 1.000 1.000

Водоизмещение т: 1027 1007

**Рул**

Площадь руля, кв.м: 4.13

Высота руля, м: 3.75

Площадь карпового таврица, кв.м: 31.36

Начальная скорость поворота, град/сек:

Угловая скорость:

Начальная скорость вращения, град/сек:

Число оборотов в минуту:

Время, с:

**Вент**

Число вентилей/рулей: 2

Число клапанов вентилей: 8

Диаметр вентилей, м: 3.70

Диаметр отсасывающего вентилей: 3.70

Шлифовальный вентилей: 2.700

Скорость судна, уз/обороты, об/мин

В балласте

В групп: 17.2 175

В групп: 15.5 175

В групп: 12.8 175

В групп: 8.6 175

В групп: 5.2 175

Скорость умеренного реверсирования, уз: 11.0

**Характеристики поворотности судна**

Поворот	L1	L2	De	Du
95	2.15954142	1.18560073	1.2633902	1.31576469
15	3.87166530	2.2161012	4.8890335	4.39941980
10	1.5797425	3.2584725	6.5207354	6.4064452
5	7.4816242	5.3051219	11.5857232	10.936081

Очистка OK Рассчитать Рассчитать характеристики поворотности

Рис. 6. Программный модуль СППР судоводія «Поворот»

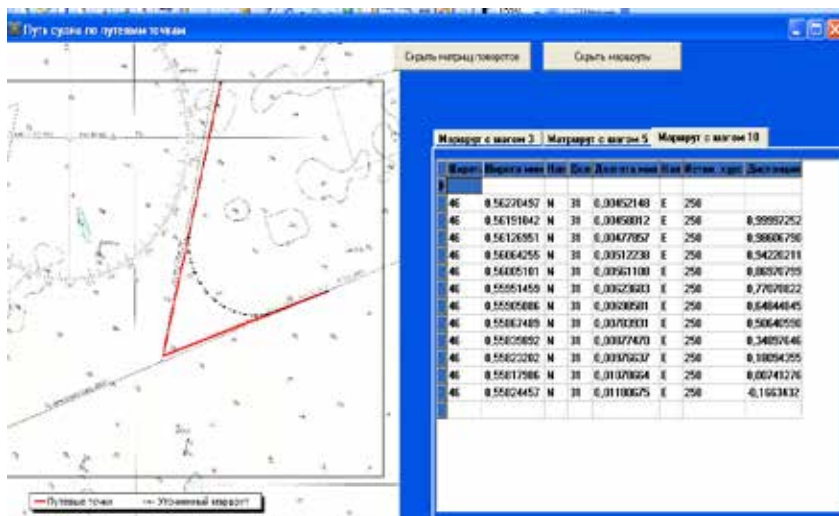


Рис. 7. Розрахунок в СППР траєкторії повороту судна

обладнання, що здатний забезпечити якісну підготовку морських фахівців на професійному рівні. До складу лабораторно-тренажерного комплексу входять: тренажер навігаційних інформаційних систем – «ECDIS Simulator», «Full Mission Navigational Bridge» – повнофункціональний навігаційний місток, «Ship Handling and ARPA Simulator» – тренажер ЗАПІ та РЛС, комплексний тренажер машинного відділення – «Engine Room Simulator», комплексний тренажер динамічного позиціонування – «Full Mission Bridge DP Simulator», тренажер глобального морського зв'язку при катастрофах на морі – «GMDSS Simulator». Об'єднання нових тренажерів у єдиний комплекс дозволило створити навчально-тренажерний комплекс «Віртуальне судно».

Практична апробація прототипу СППР судноводія довела ефективність функціонування розроблених в дослідженні моделей, методів та алгоритмів.

### 8. Висновки

Під час проведення наукового дослідження було визначено, що в умовах запровадження сучасних інформаційних технологій в судноводінні та концепції e-Navigation, найважливішою складовою підвищення безпеки сучасного судноплавства є створення СППР судноводія. При створенні таких систем необхідно враховувати, що найвагомішим чинником аварійності сучасного судноплавства, є так званий «людський фактор», тому при створенні СППР судноводія особлива увага має бути приділена саме процесам взаємодії судноводія з технічними засобами судноводіння та шляхам зниження впливу «людського елементу» на процеси управління судном.

Показано, що в сучасних умовах впровадження СППР судноводія здатна істотно знизити аварійність сучасного судноплавства, перш за все шляхом підвищення ефективності функціонування ергатичної системи «людина – технічні засоби судноводіння» та всебічного запровадження досягнень сучасних інформаційних технологій в процеси управління судном.

Визначено, що при створенні СППР судноводія особлива увага повинна бути приділена процесам накопичення та обробки вихідних даних про навігаційні ситуації, а також методам прогнозування можливих сценаріїв та їх розвиток з урахуванням основних положень

МППЗС-72 та принципів кооперативної взаємодії суден в умовах реального часу.

Показано, що перспективним напрямом розвитку СППР судноводія є застосування методів штучного інтелекту, зокрема сценарно-прецедентного підходу до побудови бази знань СППР для моделювання процесів взаємодії учасників навігаційних ситуацій.

Розроблені теоретичні і методологічні засади побудови СППР судноводія, що враховують особливості руху суден, процесу взаємодії людини з технічними засобами судноводіння та вимоги МППЗС-72.

Під час проведення дослідження розроблено ряд нових лекційних курсів та навчальних посібників з управління рухом суден та застосування інформаційних технологій в судноводінні. Запровадження новітніх навчальних курсів та технологій підготовки фахівців в навчальний процес морських навчальних закладів дозволить істотно підвищити компетентність фахівців, знизити вплив «людського фактору» на процеси управління судном, та, як наслідок, сприятиме підвищенню безпеки сучасного судноплавства.

### **Список літератури:**

1. Maltsev A.S. The ways of Enhancing the safety of Navigation // Thesis of the third General assembly of IAMU // Rock port, USA. 2002. Sec. II A. – P. 16–26.
2. Maltsev A.S. Five steps to assure navigational safety //Collection of IAMU scientific works. – Dalian.: Maritime University Press, 2006. – P. 170–179.
3. E-navigation: a global resource / E. Mitropoulos // Seaways. The Nautical Institute. – March 2007. – P. 7–9.
4. Мальцев А.С. Психологические аспекты маневра последнего момента / Мальцев А.С., Стариков И.М. // Судовождение: сб. научн. трудов / ОНМА. Одесса: «Латстар», 2002. Вып. 4. – С. 64–81.
5. Шерстюк В.Г. Гибридная интеллектуальная СППР для управления судном / В.Г. Шерстюк, А.П. Бень // Искусственный интеллект. – 2008. – № 3. – С. 490–499.
6. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / Lisowski J. // The Archives of Transport. – 2005. – No 3-4, Vol. XVII. – P. 133–147.
7. Lopez Eloy, Velasc Francisco J., Moyano Emiliano, Rueda Teresa M. – Full-scale manoeuvring trials simulation, Journal of Maritime Research, Vol. I. No. 3, 2004, pp. 37–50.
8. Мальцев А.С. Обобщенный критерий оценки согласованности системы управления и характеристик человека-оператора / А.С. Мальцев, В.В. Голиков, Д.С. Жуков // Вісник Одеського національного морського університету : зб. наук. праць. – Вип. 24. – Одеса: ОНМУ, 2008. – С. 65–75.



9. IMO SUB-COMMITTEE ON SAFETY OF NAVIGATION. 58th session. Agenda item 6. NAV 58/WP.6/Rev.1. – E-NAVIGATION. – July 2012.

10. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process / Lisowski J. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2005. – Vol. 14. – P. 68–75.

### References:

1. Maltsev A.S. The ways of Enhancing the safety of Navigation// Thesis of the third General assembly of IAMU // Rock port, USA.2002. Sec. II A. – P. 16–26.

2. Maltsev A.S. Five steps to assure navigational safety.//Collection of IAMU scientific works. – Dalian.: Maritime University Press, 2006. – P. 170–179.

3. E-navigation: a global resource / E. Mitropoulos // Seaways. The Nautical Institute. – March 2007. – P. 7–9.

4. Mal'cev A.S. Psihologicheskie aspekty manevra poslednego momenta / Mal'cev A.S., Starikov I.M. // Sudovozhdenie: sb. nauchn. trudov / OHMA. Odessa: «Latstar», 2002. – Vyp. 4. – S. 64–81.

5. Sherstyuk V.G. Gibridnaya intelektual'naya SPPr dlya upravleniya sudnom / V.G. Sherstyuk, A.P. Ben' // Iskusstvennyj intellekt. – 2008. – № 3. – S. 490–499.

6. Lisowski J. Game control methods in navigator decision support system / Lisowski J. // The Archives of Transport. – 2005. – No 3-4, Vol. XVII. – P. 133–147.

7. Lopez Eloy, Velasc Francisco J., Moyano Emiliano, Rueda Teresa M. – Full-scale manoeuvring trials simulation, Journal of Maritime Research, Vol. I. No. 3, 2004, pp. 37–50.

8. Mal'cev A.S. Obobshchennyj kriterij ocenki soglasovannosti sistemy upravleniya i harakteristik cheloveka-operatora / A.S. Mal'cev, V.V. Golikov, D.S. Zhukov // Visnik Odeskogo nacionalnogo morskogo universitetu: zb. nauk. prac'. – Vip. 24. – Odesa: ONMU, 2008. – S. 65–75.

9. IMO SUB-COMMITTEE ON SAFETY OF NAVIGATION. 58th session. Agenda item 6. NAV 58/WP.6/Rev.1. – E-NAVIGATION. – July 2012.

10. Lisowski J. Mathematical modeling of a safe ship optimal control process / Lisowski J. // Polish Journal of Environmental Studies. – 2005. – Vol. 14. – P. 68–75.

ASSESSMENT OF THE NAVIGATION SITUATION  
IN THE DECISION SUPPORT SYSTEM FOR NAVIGATOR

ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ  
КОНТЕЙНЕРОВОЗА ЗГІДНО ЛОГІЧНИХ ПРАВИЛ  
ЗАВАНТАЖЕННЯ-ВИВАНТАЖЕННЯ

Andrii Ben<sup>1</sup>

Anton Fedorov<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-52>

**Abstract.** *Purpose.* The article deals with the creation of automated systems for managing cargo operations of container ships. *Method.* The main idea of the scientific research is to study the features of the process of loading-unloading of a container ship during its multi-port going's (sequential enter to several ports during the same route). This raises the problem of "shifting", i.e. the need to move some containers on board a vessel to accommodate others. The proposed method of placing containers on the basis of logical rules of loading and unloading allows to reduce the time of stay of the vessel in port by reducing the number of "shifting" operations, which has a positive effect on the economic performance of a container ship. *Scientific novelty.* The mathematical model of loading of a container ship on the basis of logical rules is developed that allows to take into account simultaneously the multiporosity of execution of trip of the vessel and technological limitations of formation of cargo plan due to the peculiarities of their placement on the ship. The model of formation of the optimal cargo plan of the ship, taking into account the sequence of approach to the ports during the trip, is proposed. *Practical importance.* In the practical side, this work is aimed at creating a software product, the use of which will allow to solve an important scientific and applied task in the field of application of information technologies in navigation – increase the

---

<sup>1</sup> PhD of Technical Sciences, Assistant Professor,  
Vice-rector of Research,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine

<sup>2</sup> Postgraduate Student,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine

efficiency and safety of container transportation due to the introduction of ACCOMS. *Results.* Key areas of research in this field are identified. It has been shown that the creation of an automated containerized cargo operations management system (ACCOMS) will simultaneously solve a complex of cargo operations management tasks, which will reduce the time required to perform them and increase the economic efficiency of a vessel's trip. Particularly effective is the application of the proposed approach when it is applied to multi-port transportations carried out by container ships with a small number of containers (feeder transportation).

### 1. Вступ

Контейнерні перевезення – економний і надійний спосіб транспортування великих партій товарів. Контейнерні вантажоперевезення є одним з найнадійніших способів транспортування вантажу, що дозволяє забезпечити товару високу безпеку. Перевезення вантажу у контейнерах має ряд переваг, головна з яких – відсутність перевантажень товару при зміні транспортного засобу. Завдяки цьому досягається значна економія коштів при можливості гнучкого і ефективного поєднання різних видів транспорту в процесі доставки вантажу. До переваг морських контейнерних перевезень також можна віднести низьку, в порівнянні з більшістю інших видів транспорту, собівартість перевезень, велику вантажопідйомність морських суден, що дозволяє перевозити значні партії вантажу а також практично необмежену пропускну здатність морських шляхів [1, р. 145; 2, р. 1; 3, р. 374; 4, р. 3].

Перевезення різних промислових товарів і готових товарів широкого споживання в стандартних контейнерах – 20-foot equivalent unit (TEU), – поступово стає пріоритетним методом доставки вантажів, вибір якого обумовлений чотирма перевагами [5, р. 1436]:

- відсутністю необхідності працювати з вантажем безпосередньо, оскільки товари знаходяться в запломбованому контейнері;
- економією при перевезеннях завдяки ефекту масштабу;
- зручністю і економією часу при поєднанні з іншими видами транспорту;
- швидкістю і своєчасністю доставки.

Разом з тим, при плануванні контейнерних перевезень часто виникають різні проблеми, пов'язані з раціональним розміщенням вантажу

на судні, що забезпечує ефективність операцій навантаження розвантаження в портах маршруту, об'ємом і вагою вантажу, що перевозиться, а також з обмеженнями при розміщенні його в трюмах і на палубі, відповідним вимогам безпеки судна.

Розміщення вантажу впливає на провізну спроможність судна не тільки через ступінь використання вантажопідйомності і вантажомісткості, а й своїм впливом на швидкість ходу і продуктивність вантажних робіт. При невдалому розміщенні вантажів судно набуває небажаного диференту, відчуває посилену хитавицю і вібрацію, можлива сильне затоплення палуб. Ці обставини знижують швидкість судна, збільшують небезпеку штормових пошкоджень і сприяють виникненню аварійних ситуацій.

## **2. Актуальність дослідження**

При здійсненні вантажних операцій на контейнеровозі вони доволі часто здійснюються за принципом «останній завантажений – перший вивантажений», що призводить до формування неоптимального вантажного плану судна. Побудова технологічно обумовлених ланцюжків завантаження-вивантаження контейнерів, особливо, якщо маршрут судна проходить через кілька портів, призводить до виникнення проблеми так званого «шифтінга», тобто нераціональних вантажних операцій завантаження-вивантаження контейнерів на судно з метою вилучення лише потрібних в завданому порту контейнерів.

Як наслідок, контейнери, розташовані нагорі штабелю, повинні бути переміщені, щоб дозволити розвантаження контейнерів, розташованих під ними. Згідно [5, р. 1433], плата за переміщення (шифтіngu) контейнерів може бути високою, складаючи близько 200 доларів США за переміщення одного контейнера. Таким чином, метою планування розміщення вантажу на контейнеровозах є мінімізація кількості непотрібних переміщень.

Зменшення кількості «шифтінга» позитивно впливає на економічні показники перевезення контейнерних вантажів, тому являє собою актуальну наукову та практичну задачу сучасного судноводіння [6, р. 404].

Метою дослідження є розробка математичної моделі завантаження судна-контейнеровоза, що забезпечує зменшення впливу шифтінга контейнерів, і як наслідок сприяє зниженню економічних витрат на виконання рейсу.

### 3. Вклад основного матеріалу дослідження

Загальний вигляд судна-контейнеровоза та масиву контейнерів наведений на рисунку 1. Для побудови математичної моделі завантаження судна, без втрати структури оптимізаційної задачі розміщення контейнерів контейнеровоза в цілому, будемо вважати, що:

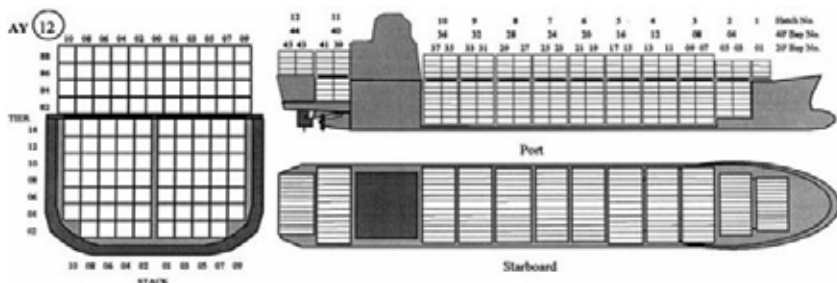


Рис. 1. Загальний вигляд судна-контейнеровоза та масиву контейнерів

1) контейнерний масив контейнеровозу має прямокутний формат і може бути представлений матрицею з рядками ( $r = 1, 2, \dots, R$ ), стовпчиками ( $c = 1, 2, \dots, C$ ) і беями ( $d = 1, 2, \dots, D$ ), з максимальною ємністю  $R \times C \times D$  контейнерів;

2) контейнери на судні є однакового (або подвійного) розміру та ваги;

3) судно починає завантажуватися в порту 1, куди воно приходить порожнім;

4) судно відвідує порти 2, 3, ...,  $N$  таким чином, що воно буде пустим в останньому порту, оскільки судно виконує рейс, в якому останній порт  $N$  є портом його відходу;

5) в кожному з портів  $i = 2, \dots, N-1$ , судно додатково може бути завантажено контейнерами, призначенням яких є порти  $i + 1, \dots, N$ ;

6) контейнеровоз перевозить всі контейнери з порту в порт ніколи не досягаючи при цьому максимально можливої кількості контейнерів на судні.

Кількість контейнерів, що завантажуються в кожному із портів визначається транспортною матрицею  $T(N-1) \times (N-1)$ . Таким чином можемо сформулювати оптимізаційну задачу завантаження контейнеровоза у вигляді:

$$f(x) = \alpha\varphi_1(x) + (1 - \alpha)\varphi_2(y) \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, N - 1, \quad j = i + 1, \dots, N$$

$$\sum_{v=i+1}^j \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D x_{jv}(r, c, d) - \sum_{k=1}^{i-1} \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C \sum_{d=1}^D x_{kj}(r, c, d) = T_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, N - 1, \quad j = i + 1, \dots, N$$

$$\sum_{k=1}^i \sum_{j=i+1}^N \sum_{v=i+1}^j x_{kiv}(r, c, d) = y_i(r, c, d) \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, N - 1, \quad r = 1, \dots, R \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D$$

$$y_i(r, c, d) - y_i(r + 1, c, d) \geq 0 \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N - 1, \quad r = 1, \dots, R - 1 \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D$$

$$\sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j}^N x_{ipj}(r, c, d) + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{p=j+1}^N \sum_{v=i+1}^p x_{ipv}(r + 1, c, d) \leq 1$$

$$j = 2, \dots, N, \quad r = 1, \dots, R - 1 \quad c = 1, \dots, C \quad d = 1, \dots, D \quad (5)$$

$$x_{jv}(r, c, d) = 0 \text{ або } 1, \quad y_i(r, c, d) = 0 \text{ або } 1$$

де бінарна змінна  $x_{jv}(r, c, d)$  визначається наступним чином: якщо в порту  $i$ ,  $(r, c, d)$  є контейнер, адресатом якого є порт  $j$  і цей контейнер був переміщений в порт  $v$ , то змінна приймає значення 1, в іншому випадку вона приймає значення 0.

Термін місце  $(r, c, d)$  представляє являє собою рядок  $r$ , стовпець  $c$  для бей  $d$  контейнеровозу. Аналогічно, змінна  $y_i(r, c, d)$  визначається наступним чином: якщо в порту  $i$ , місце  $(r, c, d)$  містить контейнер, то змінна приймає значення 1, в іншому випадку вона приймає значення 0.

Цільова функція (1) складається з двох складових: перша – загальна вартість переміщення контейнера  $i$ , друга, кількість шифтінгу в кожному порту. Передбачається, що для всіх портів, вартість шифтінга контейнеру однакова і дорівнює одиниці.

Два компоненти, що складають цільову функцію (1) визначають два критерії оптимізації: перший – це функція кількості переміщених контейнерів,  $\varphi_1(x)$ , а другий – залежить від того, як контейнерні перевезення організовуються в кожному порту,  $\varphi_2(x)$ . Ці два компоненти

об'єднуються значеннями, заданими кожною вагою  $\alpha$  та  $(1 - \alpha)$  таким чином, що формують двонаправлену структуру оптимізації.

Обмеження (2) пов'язане послідовністю з завантаження контейнера. Іншими словами, загальна кількість контейнерів на судні в порту повинна дорівнювати кількості контейнерів, які були завантажені в усіх портах  $p = 1, 2, \dots, i$  мінус загальна кількість контейнерів, вивантажених у всіх портах  $p = 1, 2, \dots, i$ .

Обмеження (3) вимагає, щоб кожне місце  $(r, c, d)$  контейнеровоза завжди займало не більше одного контейнера.

Обмеження (4) пов'язано з фізичним зберіганням контейнерів на судні, і вимагає, щоб для кожного контейнера в рядку  $r+1$ , існував ще один контейнер у рядку  $r$  для всіх  $r = 1, \dots, R - 1$ .

Обмеження (5) визначає, як контейнер може бути вивантажений з судна в порту  $j$ , таким чином, щоб, якщо контейнер займає позицію  $(r, c, d)$  в порту  $j$ , і він буде вивантажений, то не існує контейнерів вище нього, або такі контейнери вже були вивантажені у попередніх портах.

Приймаючи до уваги той факт, що сучасний контейнеровоз зазвичай перевозить кілька тисяч контейнерів, а вищенаведена оптимізаційна задача динамічного програмування є *NP*-повною, розв'язання її традиційними методами вкрай ускладнено і потребує евристичних підходів.

В ході аналізу робіт, присвячених створенню моделей і алгоритмів розміщення контейнерів на судні і термінали було визначено, що для вирішення подібних завдань використовуються, в основному, евристичні підходи, а саме: ітераційний локальний пошук (iterative local search, ils); спрямований локальний пошук (guided local search, gls); пошук зі змінною околицею (variable neighborhood search, vns); імовірнісний жадібний алгоритм (grasp); еволюційний алгоритм (evolutionary algorithm, ea); генетичний алгоритм (genetic algorithms, ga); алгоритм оптимізації мурашиної колонії (ant colony optimization, aco); імітація відпау (simulated annealing, sa); пошук із заборонами (tabu search, ts).

Проведений аналіз наукових праць дозволяє стверджувати, що для вирішення поставленої задачі найбільш доцільно застосовувати методи еволюційного програмування у вигляді генетичних алгоритмів [9, p. 22; 10, p. 586].

При цьому також з'являється можливість її додаткового уточнення і ускладнення шляхом введення додаткових обмежень по вазі, розмірам

контейнерів, та заздалегідь визначеним місцям розташування окремих груп контейнерів на судні, наприклад рефрижераторних.

Метою дослідження є розробка математичної моделі завантаження судна-контейнеровозу, що забезпечує зменшення впливу шифтінга контейнерів, і як наслідок сприяє зниженню економічних витрат на виконання рейсу.

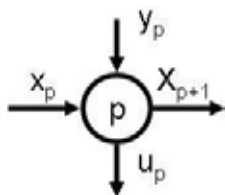
Порівняльний аналіз досліджень, проведених різними авторами, показує, що ефективним методом вирішення проблеми є комбінований підхід, заснований на формуванні оптимального плану завантаження контейнеровозу з використанням логічних правил завантаження-вивантаження та послідовним застосуванням евристичних методів розв'язку оптимізаційної задачі. Зазначений підхід можна краще пояснити, якщо розглянути контейнеровоз у вигляді графу, як наведено на рисунку 2.

На рис 2 вузол  $p$  являє собою порт, в якому відбуваються процеси завантаження та вивантаження судна. Стан контейнеровозу змінюється коли він заходить та виходить з порту  $p$ . Зазначені зміни відображаються у вигляді дуг  $x_p$  та  $x_{p+1}$ , відповідно. Стан  $x_p$  перетворюється на  $x_{p+1}$  відповідно до двох наступних рішень.

1. Якщо існуючі контейнери вивантажуються в порту  $p$ . Це рішення може бути представлено як  $u_p$ . Воно може бути розглянуто як сукупність двох змінних:

– змінна  $q_p$  визначає контейнери, які повинні бути вивантажені, оскільки порт  $p$  є портом їх призначення, або якщо вони блокують собою інші контейнери, призначенням яких є порт  $p$ .

– змінна  $v_p$  визначає контейнери, які повинні бути вивантажені для кращого розташування контейнерів на судні, що забезпечить зменшення шифтінгу (переміщення контейнерів) при заходженні судна в наступні порти.



**Рис. 2. Вузол і дуги графу процесу завантаження контейнеровоза**

2. Як перезавантажити контейнери судна з порту  $1, \dots, p-1$ , місцем доставки яких є порти  $p+1, \dots, p$ , і як завантажувати контейнери з порту  $p$ , які будуть перевозитися в наступні порти. Таке рішення визначається змінною  $y_p$ .

Слід зазначити, що  $q_p$  та  $v_p$  можуть істотно змінюватись в залежності від кількості контейнерів, що будуть перезавантажені на судно.



Інакше кажучи, це гарантує, що розташування в контейнеровозі при виході з кожного порту  $p$  ( $x_{p+1}$ ) залежить від розташування контейнерів, коли судно прибуває до порту  $p$  ( $x_p$ ), плюс кількість контейнерів, які завантажуються або вивантажуються у порту  $p$ .

Програмна реалізація процесу розміщення контейнерів на судні потребує визначення двох складових:

- оскільки розміщення контейнерів на судні може бути представлено тривимірною матрицею, при вирішенні оптимізаційної задачі розміщення контейнерів на судні необхідно здійснювати послідовний аналіз її стану для кожного із портів з метою зменшення шифтінгу (кількості контейнерів, що перезавантажуються);

- зміни у стані розміщення контейнерів на судні доцільно здійснювати на основі правил розвантаження та правил завантаження, представлених  $ur$  і  $ur$  відповідно, що може бути здійснено за допомогою евристичних методів та процедур імітаційного моделювання.

Рисунок 1 важливий для ясного розуміння того, що розташування на контейнеровозі буде визначатися двома рішеннями в кожному порту: як розвантажити та як завантажити судно. У реальному житті розвантаження та завантаження контейнеровозів здійснюється відповідно до досвіду судноводія, проте значно ефективніше вирішувати цю проблему за допомогою програмних засобів, що виконують розміщення контейнерів на основі логічних правил та евристичних алгоритмів.

Таким чином, розташування вантажу на контейнеровозі при виході з кожного порту  $p$  ( $x_{p+1}$ ) залежить від схеми розміщення на контейнеровозі, коли він тільки прибуває до Порту  $p$  ( $x_p$ ), плюс скільки контейнерів розвантажується ( $u_p$ ) та завантажується ( $y_p$ ) в порту  $p$ .

Далі розглянемо, як представляти рішення оптимізаційної задачі формування вантажного плану контейнеровозу. При цьому будемо застосовувати спеціальний підхід до кодування / декодування, який поєднує в собі правила, що описують спосіб завантаження та розвантаження контейнеровозу, а також процедуру моделювання. Це кодування є представленням за правилами.

Обчислювальна реалізація процесу розміщення за правилами залежить від визначення наступних елементів.

1. Оскільки контейнеровози мають модульну структуру, схема розташування на контейнеровозі може бути представлена матрицею  $B$ ,

яка називається матрицею стану, і ця матриця – це змінна, що відноситься до стану контейнеровозу ( $x_p$  і  $x_{p+l}$ ).

2. Зміни у стані контейнеровозу, здійснені за допомогою правил розвантаження (ПР) та правил завантаження (ПЗ), представлених  $u_p$  і  $y_p$  відповідно, можуть бути виконані за допомогою процедури обчислювального моделювання.

Матриця  $B$  – це схема розміщення на контейнеровозі, оскільки кожен елемент в  $B$  представлений  $B_{drc}$ , і він описує, чи це контейнер, пунктом призначення якого є Порт  $p$  в комірці, розташований у рядку  $r$ , стовбці  $c$  і відсіку  $d$ , якщо  $B_{drc} = p$ ; якщо  $B_{drc}$  порожній, то  $B_{drc} = 0$ . Щоб краще це проілюструвати, матриця  $B$ , де  $D = 3$  і  $R = C = 2$ , показана на рисунку 3.

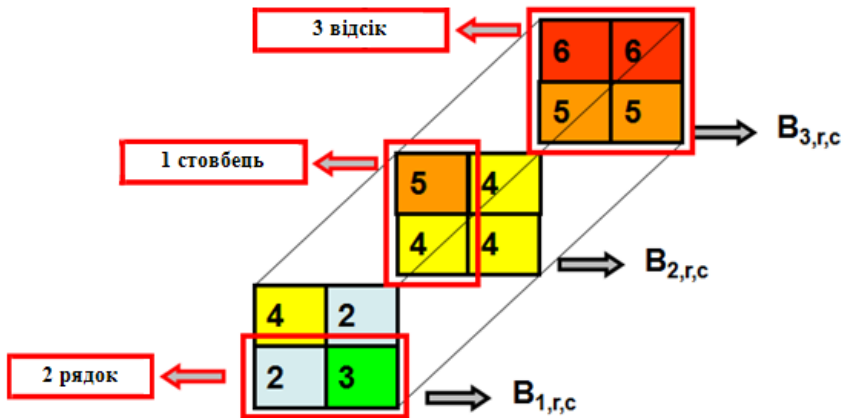


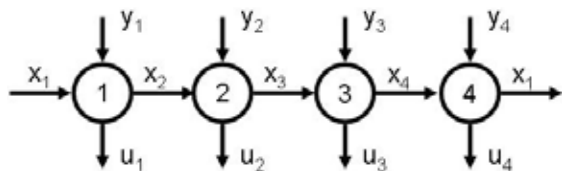
Рис. 3. Матриця стану  $B$ , що представляє розташування контейнерів у контейнеровозі при русі до 6 портів

На рисунку 3 рядок 2 представляє нижню частину контейнеровозу, а рядок 1 – верхню частину контейнеровозу. Таким чином, елемент (1, 1, 1) дорівнює 4, що означає, що цей модуль зайнятий контейнером, пунктом призначення якого є порт 4. Використовуючи ті ж критерії, елемент (3, 2, 2) дорівнює 5, і це означає, що цей модуль зайнятий контейнером, призначенням якого є порт 5.

Припускаючи, що матриця  $B$  на рисунку 3 представляє контейнеровоз в порту 2, для розвантаження цього контейнеровозу необхідно

перемістити контейнери, розташовані в модулях (1, 2, 1) та (1, 1, 2). Однак контейнер у модулі (1, 2, 1) може бути розвантажений лише якщо контейнер, розташований в комірці (1, 1, 1), теж розвантажений; навіть незважаючи на те, що пунктом призначення цього контейнера є Порт 4. Метою процесу завантаження контейнеровозу (ПЗК) є мінімізація кількості переміщень подібного роду шляхом адекватної схеми розміщення у відсіках контейнеровозу у кожному порту.

Таким чином, запропонований підхід розміщення контейнерів за правилами розглядає ПЗК як проблему, в якій матриця  $B$  – це схема розміщення на контейнеровозі ( $x_p$ ), до прибуття в Порт  $p$ . Вона буде змінюватися у кожному порту шляхом визначення, як саме виконувати операції розвантаження ( $u_p$ ) та завантаження ( $y_p$ ), визначаючи ПР та ПЗ відповідно. Вибір ПР або ПЗ для порту 2 може опосередковано впливати на схему розміщення на контейнеровозі в Порті 4, оскільки графічне представлення ПЗК має форму, показану на рисунку 4.



**Рис. 4. Графічне представлення для ПЗК з чотирма портами призначення**

Нами було визначено 6 основних правил завантаження контейнеровозу та 2 правила вивантаження, а саме:

*Правило завантаження ПЗ1:* за цим правилом матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком, зліва направо, починаючи з нижнього ряду для кожного відсіку таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені на найнижчих рядках, і кожен відсік заповнюється перед наступним.

*Правило завантаження ПЗ2:* за цим правилом матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком, зліва направо, починаючи з першого відсіку, і заповнюючи лише один рядок на відсік таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені в найнижчих рядках і розподілені між відсіками.

*Правило завантаження ПЗ3:* це правило є зворотним ПЗ1, що означає, що матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком, справа наліво, починаючи з нижнього ряду для кожного відсіку таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення були розміщені в найнижчих рядках і кожен відсік заповнюється перед початком наступного.

*Правило завантаження ПЗ4:* це правило є зворотним ПЗ2 в тому сенсі, що матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком, справа наліво, один рядок на відсік починаючи з першого відсіку, доки не досягне останнього таким чином, щоб контейнери з найостаннішим пунктом призначення розміщуються на найнижчих рядах і розподілялися між відсіками.

*Правило завантаження ПЗ5:* за цим правилом матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком зліва направо контейнерами, призначеними для найближчого порту, починаючи з першого відсіку та продовжуючи, доки в стовпчику не буде досягнуто кількість елементів  $\theta_p$ . Значення  $\theta_p$  обчислюється за рівнянням:

$$\Theta_p = \left[ \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=p+1}^N T_{ij}}{D * C} \right]. \quad (6)$$

Потім інший відсік заповнюється таким чином, щоб контейнери з найближчим призначенням були розміщені спочатку для формування штабелів.

*Правило завантаження ПЗ6:* це правило є зворотним ПЗ5 в тому сенсі, що матриця  $B$  заповнюється рядок за рядком справа наліво контейнерами, призначеними для найближчого порту, починаючи з першого відсіку і продовжуючи, доки не досягається кількість елементів  $\theta_p$  у стовпчику. Значення  $\theta_p$  також обчислюється за рівнянням (6).

*Правило розвантаження ПР1:* припустимо, що контейнеровоз прибуває у Порт  $p$ . За цим правилом вилучаються лише контейнери, пунктом призначення яких є Порт  $p$ , і всі інші, що блокують штабель.

*Правило розвантаження ПР2:* це правило зазначає, що контейнеровоз повинен розвантажувати кожен контейнер при прибутті в певний Порт  $p$  таким чином, щоб він міг повністю перебудувати кожен штабель.

Щоб уникнути необхідності використання двох значень, щоб вказати, які ПЗ і ПР будуть використовуватися для кожного порту, можна спростити кодування, визначивши різні комбінації ПЗ і ПР. Конкретна комбінація ПЗ і ПР для Порту  $p$  визначається як правило ПП.

Щоб краще проілюструвати концепцію правил, шість ПЗ і два ПР, описані вище, можуть бути об'єднані для створення нових 12 правил. Таблиця 1 ілюструє всі правила, створені в результаті цих комбінацій ПЗ та ПР.

Таблиця 1

**Правила, створені шляхом поєднання ПЗ та ПР**

Правила завантаження	Правила розвантаження	Підсумкове правило
ПЗ1	ПР1	ПП1
	ПР2	ПП2
ПЗ2	ПР1	ПП3
	ПР2	ПП4
ПЗ3	ПР1	ПП5
	ПР2	ПП6
ПЗ4	ПР1	ПП7
	ПР2	ПП8
ПЗ5	ПР1	ПП9
	ПР2	ПП10
ПЗ6	ПР1	ПП11
	ПР2	ПП12

В таблиці 1 показані різні комбінації ПЗ і ПР. Наприклад, правило 2 – це комбінація правила розвантаження ПР2 та правила завантаження ПЗ1. Це кодування необхідне для представлення рішення ПЗК, в якому використовується вектор, число елементів якого дорівнює кількості портів.

Для збереження умов остійності судна необхідно додатково обчислювати суму відстані між центром маси та геометричним центром контейнеровозу у кожному відсіку  $d$  у кожному порту.

Для вирішення оптимізаційної задачі ПЗК з використанням логічних правил нами застосовуються методи імітаційного моделювання та евристичні методи, якими визначаються набори логічних правил та послідовність їх застосування.

Найбільш ефективним та відносно нескладним з евристичних методів в плані практичної реалізації, враховуючи існуючі програмні продукти (Mathlab, Simulink) тощо нами були обрані генетичні алгоритми (ГА).

Відповідно вирішення проблеми оптимального завантаження контейнеровозу було розроблено ГА з наступною структурою.

*Структура ГА.* ГА використовує сукупність елементів, що представляють собою:  $A(t) = \{A_1^t, \dots, A_n^t\}$  для кожної генерації (ітерації)  $t$ , в якій кожен елемент – це вектор правил. У процесі обчислення, сукупність елементів зберігається в матриці  $A(t)$ , і кожен рядок  $A_i^t$  представляє цей вектор правил. Кожен вектор  $A_i^t$  оцінюється за кількістю переміщень та показником остійності. Далі розраховується придатність, тобто міра того, наскільки успішним є цей елемент в задачі розміщення.

Придатність розраховується для всієї сукупності і ґрунтується на цій новій сукупності, яка поєднує в собі найбільш ефективні елементи, які утворюють сукупність  $t + 1$ . Під час формування нової сукупності деякі елементи з сукупності  $t$  надаються процесом перетворення генетичними операторами для формування нових правил.

Ці перетворення включають в себе унарні операції  $m_i$  (мутації), які дозволяють створювати нові правила за допомогою невеликих змін окремих атрибутів ( $m_i: A_i \rightarrow A_i$ ) і перетворення верхнього порядку  $c_j$  (кросовер), що генерує нові елементи, об'єднуючи один або декілька елементів ( $c_j: A_j \times \dots \times A_k \rightarrow A_j$ ).

Зазначений процес здійснюється до досягнення визначеної раніше попередньої кількості генерацій. Наступним важливим етапом є кодифікація структури даних для кожного окремого елемента.

*Кодифікація структури даних для кожного окремого елемента.* Кожний елемент ГА асоціюється з набором правил за допомогою вектора  $v$ , наприклад, чотирьохелементного. Значення всередині елементів відповідають кожній комбінації розвантаження та ПЗ (від ПП1 до ПП12), яка буде застосовуватися у кожному Порту (від 1 до 4). Набір правил для різних елементів зберігається в матриці, а кожен стовпець представляє окремий елемент, показано на рисунку 5, де перший стовпець містить чотирьохелементний вектор  $v_1$ , в якому кожне значення відповідає таблиці 1.

Матриця  $A$  має два вектори  $v_1$  і  $v_2$ . Коли елемент визначено, то також може бути визначено сукупність, яка складається з елементів, що зберігаються в матриці  $A$ . Оскільки кожен стовпець матриці  $A$  представляє елементи / рішення, кожен елемент  $A(i, j) = k$  визначає, яке правило  $k$  ( $k$  дорівнює 1-12) в Порті  $i$  буде використовуватися, якщо вибрати елемент  $j$ . Наприклад,  $A(1, 1) = 6$  означає, що елемент / рішення 1 у Порті 1 повинен застосувати правило ПП6, тобто розвантаження контейнеровозу за ПР2 та завантаження за ПЗ3.

Оцінка придатності рішення чи доцільність варіанта розміщення відповідає за оцінку елементу в межах сукупності в генерації  $t$ . Таким чином, придатність рішення побудована так, що рішення з меншим показником мають вищі показники придатності:

$$Fit(A_i) = f(A_i), \quad (7)$$

де  $f(A_i)$  – оцінка придатності, згідно з комбінацією кількості переміщень та показника нестабільності,

Іншими словами, вона транслює рішення, запропоновані набором правил, що зберігаються в векторі  $A_i$ , з точки зору кількості переміщень рівняння та показника нестабільності шляхом моделювання схеми розташування контейнерів в контейнеровозі, коли він подорожує від порту до порту. Наступним кроком є вибір елементів для формування наступної генерації.

*Вибір елементів для наступної генерації.* Процес формування сукупності – це випадковий вибір («колесо рулетки»), де ймовірність  $Q(A_i)$  використовується для вибору елементу  $A_i$  для наступної генерації в сукупності з елементами  $b$ . Значення  $Q(A_i)$  можна отримати, використовуючи рівняння (8).

$$Q(A_i) = Fit(A_i) / \sum_{i=1}^{n_{групп}} (Fit(A_i)). \quad (8)$$

Найкращий елемент поточної генерації завжди залишається в наступній генерації. З метою отримання нових елементів застосовуються оператори кросовера і мутації.

Порт	Елемент 1	Елемент 2
1	6	3
2	1	5
3	12	10
4	2	7

$v_1$                        $v_2$

**Рис. 5. Відношення між кодуванням елементів ГА та набором правил для кожного елемента (вектор стовпця)**

*Кросовер.* Оператори кросовера генерують нові елементи для формування наступної сукупності шляхом об'єднання інформації з минулих генерацій, яка присутня в елементах. Тут використовуються два оператора кросовера, які описуються наступним чином.

Два елемента,  $A_1$  та  $A_2$ , з  $N$  елементами, випадковим чином обираються з сукупності у генерації  $t$ . Потім формується ціле число  $\delta$  в інтервалі  $[1, N-1]$ , а елементи  $A_1$ , що знаходяться в положеннях  $\delta$  до  $N$  обмінюються елементами з  $A_2$ , які розташовані в положенні  $\delta$  до  $N$ . Цей обмін дасть два нових елементи,  $nA_1$  і  $nA_2$ , які можуть з'явитися в наступній генерації.

Структура розробленого ГА має вигляд, наведений на рисунку 6.

*Оператор мутації.* Оператор мутації змінює  $pm$  елементів матриці  $A$ , де  $pm$  – відсоток сумарних бітів, які мутують.

Вибір того, який елемент  $A_{ij}$  мутується, полягає у випадковому виборі індексу рядка та індексу стовпця, а потім їхній зміні, при цьому розмір підсукупності  $As_1'$  та  $As_2'$  однаковий і дорівнює 5% від загальної сукупності.

Запропонований новий комбінований підхід до задачі тримірного планування завантаження контейнеровозів, що має наступні переваги:

- дозволяє здійснювати компактне кодування, представляючи рішення як вектор з елементами  $P$  замість двійкових змінних  $(R \times C) \times (P + P^3)$ , що дає можливість спростити обробку даних на вирішення проблеми з оптимального розміщення контейнерів;
- досвід кваліфікованого персоналу може бути включений в процес оптимізації у формі правил та обчислювального моделювання;
- формування рішення з використанням запропонованих математичних моделей завжди є можливим, та дозволяє уникнути проблеми подовженого часу обробки.

– новий підхід до кодування значно зберігає час на обчислення і дозволяє формувати якісні рішення з розміщення контейнерів на судні.

На основі розроблених математичних моделей нами було створено прототип АСУВОК, яка здатна істотно полегшити и контроль за завантаженням / вивантаженням фідерного контейнеровоза.

Робота системи здійснюється наступним чином. При заході контейнеровоза (3) в порт здійснюється підключення по мережі wifi (2) судової системи підтримки прийняття рішення (5) контейнеровоза до



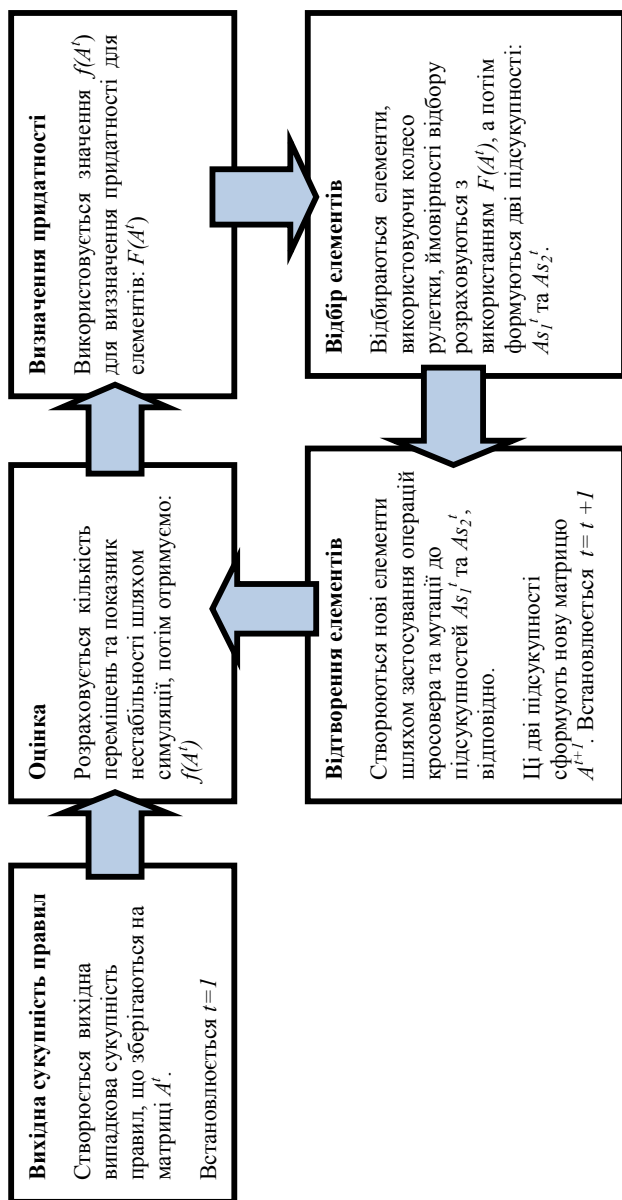


Рис. 6. Структура ГА

мережі Інтернет, в яку вже підключені комп'ютери (4) причальних контейнерних перевантажувачів (1). Відбувається реєстрація в мережі і план завантаження відображається на комп'ютері перевантажувача. Піднятий контейнер зважується вагами перевантажувача, і інформація про усі параметри надходить через мережу Інтернет в суднову інформаційну систему. Таким чином, АСУВОК дозволяє капітану судна оперативно оцінити ступінь його завантаження, зменшити простой, і забезпечити безпеку перевезень. При цьому використовуються новітні технології передачі інформації, зокрема технології zigbee.

Структура АСУВОК наведена на рисунку 7. Слід зазначити, що відмінними рисами розробленої автоматизованої системи є її відносно невелика вартість, а також орієнтованість до застосування на фідерних перевезеннях (особливістю фідерних перевезень є мультипортовість та невелика кількість контейнерів на судні: 600-1200). Кількість програмних продуктів, що забезпечують вирішення даного класу задач на поточний момент часу обмежена.

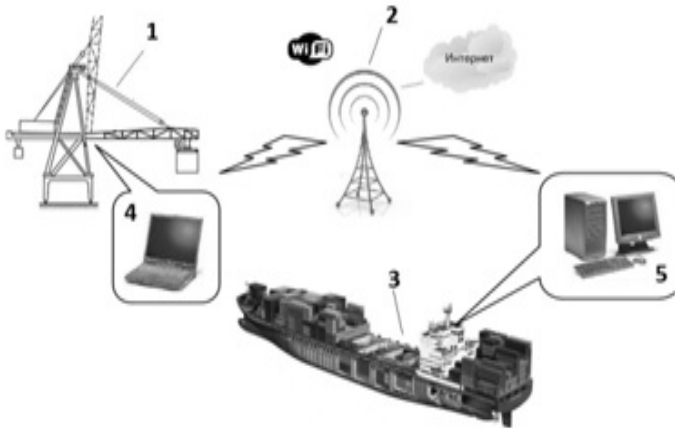


Рис. 7. Структура АСУВОК

Структура АСУВОК: 1 – контейнерний перевантажувач; 2 – станція WiFi; 3 – контейнеровоз; 4 – ноутбук в кабіні контейнерного перевантажувача; 5 – персональний комп'ютер у складі суднової автоматизованої системи, на якому розташована система підтримки прийняття рішень.

### 4. Висновки

Підсумовуючи підсумки проведеного аналізу наукових досліджень вітчизняних та закордонних авторів у зазначеній галузі, було з'ясовано, що питання створення інтелектуальних автоматизованих систем управління процесами завантаження-вивантаження контейнеровозів є актуальною науковою проблемою сьогодення, яка потребує вирішення з урахуванням нагальних поточних потреб морської індустрії.

Створення нових методів або алгоритмів оптимізації процесу складання вантажного плану судна типу контейнеровоз є одним з найбільш актуальних питань сьогодення. Аналіз, який проведено у даній роботі, дозволив розробити власну модель і алгоритм розміщення контейнерів на судні, що оптимізує процес складання вантажного плану судна сприяє підвищенню безпеки контейнерних перевезень.

Застосування пропонованого підходу до побудови вантажного плану контейнеровозу дозволяє також поліпшити економічні показники виконання судном рейсу за рахунок зменшення часу виконання вантажних операцій та тривалості стоянки судна в портах.

Визначено, що в умовах запровадження сучасних інформаційних технологій в судноводінні найважливішою складовою підвищення ефективності та безпечності контейнерних перевезень стає створення АСУВОК. При створенні таких систем необхідно враховувати, що найвагомішим чинником аварійності сучасного судноплавства, є так званий «людський фактор», тому при створенні таких систем особлива увага має бути приділена саме зниженню суб'єктивності прийняття рішень при формуванні вантажних планів контейнеровозів.

Таким чином, в сучасних умовах впровадження АСУВОК здатна істотно підвищити ефективність здійснення контейнерних перевезень та знизити аварійність сучасного судноплавства.

В цілому слід зазначити, що на даному етапі світова контейнерна система вимагає узгодженого розвитку – має бути забезпечене не тільки будівництво нових ультрасучасних суден а й модернізація існуючих, будівництво нових великих спеціалізованих портів і терміналів, створення великовантажних типів розвантажувально-вантажної техніки. Необхідний також контроль за пересуванням контейнерів як в порту так і протягом усього шляху у морі і на суші, узгодженість країн-партнерів з торгівлі, що ще більше ускладнює проблему, перетворюючи її, по суті, в глобальну.

**Список літератури:**

1. Dyckhoff, H. (1990). A typology of cutting and packing problems. *European Journal of Operational Research*, 44, 2, 145–159.
2. Fan, L., Low, M.Y.H., Ying, H.S., Jing, H.W., Min, Z., & Aye, W.C. (2010). Stowage planning of large containership with tradeoff between crane workload balance and ship stability. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computers Scientists*, III, 1–7.
3. Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. (2006). Multi-objective simultaneous stowage and loading planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*, 171, 3, 373–389.
4. Vacca, I., Bierlaire, M., & Salani, M. (2007). Optimization at container terminals: status, trends and perspectives. *7-th Swiss Transportation Research Conference, September*, 1–21.
5. Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimizing stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, 183, 3, 1433–1446.
6. Wilson, I., & Roach, P.A. (1999). Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning. *Journal of Heuristics*, 5, 4, 403–418.
7. Valente, J.M.S., & Alves, R.A.F.S. (2005). Filtered and recovering beam search algorithm for the early/tardy scheduling problem with no idle time. *Computers & Industrial Engineering*, 48, 2, 363–375.
8. Ribeiro, C.M., Azevedo, A.T., & Teixeira, R.F. (2010). Problem of assignment cells to switches in a cellular mobile network via beam search method. *WSEAS Transactions on Communications*, 9, 1, 11–21.
9. Michalewicz, Z. (1996). *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. London : Springer-Verlag.
10. Dubrovsky, O., Levitin, G., & Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the containership stowage problem. *Journal of Heuristics*, 8, 6, 585–599.

## DEVELOPMENT OF MEATCONTAINING PRODUCTS WITH A BALANCE OF FATTY ACIDS COMPOSITION

Nataliia Bozhko<sup>1</sup>

Vasyl Pasichnyi<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-53>

**Abstract.** Correcting low consumption of  $\omega$ -3 and  $\omega$ -6 polyunsaturated fatty acids and reducing the total consumption of fats in the human diet to physiologically sound standards is an urgent task for nutritionists and food manufacturers. The solution to this problem is through the development and implementation of new combination meat products with a balanced amino acid and fatty acid composition (FAC). The aim of research was to study and analyze the biological performance of fats of meatcontaining combined products from cooked group with balanced FAC. Cooked group products have been used as a model to study the biological effectiveness of fats meatcontaining products with meat of waterfowl and freshwater fish to achieve this goal. It was boiled sausages with Muscovy duck meat, with duck meat and *Carassius gibelio*, meat bread with Muscovy duck meat and silver carp meat. The determination of nutritional value was carried out by the calculation method. The fatty acids profile (FAP) was determined in the test samples and the ratio of fatty acids (FA). The level of satisfaction of the recommended daily requirement was calculated. The conducted studies have confirmed that the lipids of the developed meatcontaining products of the boiled group are characterized by a high content of unsaturated, including essential, FA in their composition – linoleic, oleic, linoleic. The high content of MUFA C18:1  $\omega$ -9 (oleic) was experimentally established in all developed products – 43,07-45,48 g/100 g fat. It is experimentally proved that the significant content of  $\omega$ -3 PUFA, deficiency of which is characteristic for nutrition of the population of Ukraine, in the developed meatcontaining products of the cooked group (0,21-0,39 g/100 g of product) can satisfy

---

<sup>1</sup> Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,  
Sumy State University, Ukraine

<sup>2</sup> Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Head of Meat Technology and Meat Products,  
National University of Food Technology, Ukraine

the recommended daily requirement for essential FA by 28%. It is determined that the ratio between individual families FA  $\omega$ -3/ $\omega$ -6 in the developed products is from 1:7 to 1:9,8 at the recommended physiological norms of ideal fat food 1:5-1:10. Meatcontaining products of boiled groups made using Muscovy duck and freshwater aquaculture with such content and combination of PUFA can be recommended for nutrition of a healthy person. The above results suggest that the use of the proposed recipe solutions of meatcontaining combined products of the cooked group increase their nutritional value. It has been found that lipids of meatcontaining cooked products correspond to optimal values for most of the calculated biological efficiency indicators. Taking into account the systematized data on a wide range of clinical and pharmacological effects of  $\omega$ -3 and  $\omega$ -6 PUFA, it is possible to consider meatcontaining combined products of cooked group based on duck meat and freshwater aquaculture as a source of essential FA in the human diet and use them for recovery of lipid balance in the diets of the modern Ukraine population.

### **1. Introduction**

With the increasing availability of information, there are more and more consumers in the world today who are interested in their diet and prefer a healthy lifestyle.

A balanced diet within the nutrition is one of the common food trends of the last few years. Customers prefer environmentally friendly products with a balanced low calorie composition, which requires efficient evaluation of the quality of these products [1, p. 79]. According to statistics, 78% of consumers are ready to pay 50-100% more for natural, healthy foods [2, p. 42].

Development of new modern products with increased nutritional and biological value becomes an urgent problem for food producers. In the current situation, an important factor in the adjustment of the diet is combined products created on the basis of the plant and animal raw materials combination, taking into account the physiological needs of the human body.

One of the key solutions of this problem is the development and implementation of specialized foods with balanced FAC. Nowadays there is a violation of the nutritional status of the population in Ukraine [3, p. 6].

Animal fats predominate in diets, that characterized by the dominant content of saturated FA and deficiency of essential PUFA. Lipids are one of

the important and necessary components of the modern human diet, which provide the body with the energy needed for metabolism, act as a regulator of metabolic processes, and are structural elements of the membranes of all cells [4, p. 4].

For this reason the content of lipids in food, their composition and the ratio of individual classes are given special attention.

The combination of raw materials with different origins in the formation of multicomponent foods can help to increase the biological efficiency of their lipids.

One of the problems of creating multicomponent products is the fat imbalance by the main fatty acid indicators, the main of which are the ratio of saturated (SFA), monounsaturated (MUFA) and polyunsaturated fatty acids (PUFA), should be 1:1:1 and the PUFA ratio  $\omega$ -6: $\omega$ -3, which ideally should be 9...10:1 [5, p. 15].

Therefore, the topical question today is the correct ratio of PUFA and the quantitative provision of human body PUFA  $\omega$ -6 and  $\omega$ -3, the lack of which leads to inhibition of growth in children, decreased immunity, impaired water metabolism, slow healing of wounds and can lead to cirrhosis, kidney damage, infertility [6, p. 9].

### 2. Literature review and problem statement

The most important chemical characteristic of lipids is the FA composition. Based on the obtained data [7, p. 15; 8, p. 67], the FA classification is proposed, according to which four classes of FA are distinguished: essential (oleic, linoleic, arachidonic, linolenic, docosahexaenoic), nonessential (stearic, palmitic, myristic), anti-alimentary (saturated and monounsaturated (more than 20)) and toxic (acetylene with triple bonds) FA, oxyacids, acyclic (with 5 or 3 membered cycles in the radical) FA.

According to the concept of an ideal fat diet, the fat component of the daily diet should provide no more than 30% of the energy requirement, incl. in equal quantities separate fractions of fatty acids, namely SFA:MUFA:PUFA = 1:1:1 [4, p. 6].

Such a composition of "ideal" fat is basic for the development of norms of physiological needs of the population in basic nutrients and energy. Depending on the number of C atoms from the end of the fatty acid chain to the nearest double bond, it can be attributed to one of the groups:  $\omega$ -3,  $\omega$ -6,  $\omega$ -7,  $\omega$ -9 etc.

FA can perform various functions, including bioenergetics. In this case, some fatty acids are part of intracellular phosphoglycerols, sphingomyelins, cerebrosides, and other biologically active lipids, which are the most important structural elements of cells (membranes, liposomes).

Such FA that perform unique plastic functions include arachidonic acid C20:4 ( $\omega$ -6), docosahexaenoic C22:6 ( $\omega$ -3) [9, p. 1; 10, p. 213].

The high proportion of  $\omega$ -3 acids in the product contributes to the prevention of a number of diseases, including cancer. In conditions of specific unsaturated FA deficiency, the tails of saturated FA such as stearic, for example, are embedded in the structure of plastic lipids.

The authors [11, p. 678] proved that such replacement causes the destruction of cells of the smooth muscle of the heart due to the decrease in plasticity and permeability of membranes. Damage to the heart muscle is prevented by the addition of unsaturated FA to the diet [12, p. 63].

Experiments on many mammalian species have shown that deficiency or absence in the PUFA diet leads to profound disturbances in vital processes, the main ones being growth retardation in young and inability to reproduce in sexually mature organisms [13, p. 284].

Researchers have shown that essential PUFA are synthesized from simpler linoleic and linolenic acids. Essential PUFA such as eicosapentaenoic and docosahexaenoic FA, which are representatives of the  $\omega$ -3 FA families, are synthesized by lengthening the carbon chain and forming double bonds in the linoleic acid molecule. Arachidonic acid and other FA belonging to the  $\omega$ -6 PUFA family are formed from linoleic acid through the extension of the carbon chain and the formation of double bonds [14, p. 154].

Biological functions of food  $\omega$ -3 FA in the body [15, p. 194]: provide energy and carbon atoms; eicosapentaenoic and docosahexaenoic (DHE) fatty acids are a precursor to  $\omega$ -3 eicosanoids; the data increase indicates the specific role of DHE in membrane function, especially in the retina and neuronal tissues. Deficiency of  $\omega$ -3 PUFA results in loss of DHE in brain phospholipids and retina with compensatory replacement 22:5  $\omega$ -6. This slight change in the phospholipid structure of the membrane is sufficient to cause memory loss, mental impairment and visual acuity.

Linoleic acid is a structural component in ceramides of the water barrier in the skin; arachidonic acid is a precursor to eicosanoids.  $\omega$ -6 FA may also play the role of a second messenger in the process of signaling through cell mem-



branes. Linoleic FA deficiency may occur as a secondary condition in other disorders such as lack of protein and impaired fat absorption, as a result of complete parenteral nutrition with insufficient intake of linoleic acid [16, p. 345].

According to the results of studies of the Ukraine population diet, the fact of excessive consumption of SFA at the expense of consumption of dairy products and  $\omega$ -6 FA at the expense of sunflower oil consumption has been established [17, p. 5]. However, the ratio of  $\omega$ -6 to  $\omega$ -3 FA in the human diet is an important indicator. It is scientifically proved that essential FA must account for 4-6% of the energy value of the daily diet of an adult, and the ratio  $\omega$ -6/ $\omega$ -3 PUFA should be 10:1, and in cases where there is a violation of lipid metabolism – 5:1 and even 3:1 [18, p. 9, 19, p. 53]. For the elderly, the content of linoleic acid should be about 40%, and linolenic acid – 4%, the ratio of PUFA to SFA – 2:1 [6, p. 8; 20, p. 180].

The analysis of the results of the actual nutrition of the population of Ukraine shows that these acids actually enter the human body in the ratio of 10:1 to 30:1 [21, p. 49].

That is, some of the useful for preventing age-related diseases of the FA family  $\omega$ -3 against other unsaturated FA should be as large as possible.

Hence, the correction of low intake of  $\omega$ -3 PUFA and the reduction of total fat intake in the human diet to physiologically based norms is an urgent task for nutritionists and food producers.

This can be addressed through the development and implementation of new combined meat products with balanced FAC.

Therefore, the purpose of our work was to study and analyze the biological efficiency of fats of meatcontaining combined foods with balanced FAC.

### 2. Materials and methods

To achieve this goal as a model for the study of the fat biological effectiveness of meatcontaining poultry meat products, which, in addition to the actual use of poultry meat and poultry meat mechanically deboned [22, p. 145] was combined meat of waterfowl and freshwater fish for cooked products on the example of sausages with Muscovy duck meat, sausage cooked with Muscovy duck meat and silver crucian meat, meat bread with Muscovy duck meat and silver carp.

Meatcontaining sausages technology used Muscovy duck meat, soy isolate, pork skin emulsion, milk powder and a functional supplement Fibra 110 (Germany) were also introduced into the recipe.

The recipe for the control sample of sausages included duck, pork fat, first-grade beef, starch, salt and spices, sodium nitrite [23, p. 97–98]. Formulations of sausages are presented in table 1.

Table 1

**Developed recipes of sausages with Muscovy duck meat**

<b>Ingredients</b>	<b>Control sample</b>	<b>Test sample</b>
Duck meat	40	-
Muscovy duck meat	-	40
Pork fat	10	10
Soy isolate	-	10
First-grade beef	47	10
Milk powder	-	3
Fibra 110	-	2
Pork skin emulsion	-	25
Starch	3	-
Total	100	100
Salt	2,5	2,5
NaNO <sub>2</sub>	0,005	0,005
Sugar	0,1	0,1
Spices	0,35	0,35

In addition, a formulation of meatcontaining sausage cooked from the waterfowl and *Carassius gibelio* meat was developed, which included the ingredients in the following ratio: Muscovy duck meat 35%, minced fish (*Carassius gibelio*) 45%, pork fat 10%, milk powder whey 5%, wheat flour 1%, chicken eggs 4% and spices. The boiled sausage "Otdelnaya", which included 60% beef, 23% pork, 15% pork fat was taken as an analogue [24, p. 18].

Meat bread "Chainyi" was chosen as an analogues for the production (DSTU 4436:2005) [25, p. 20].

Muscovy duck meat was used to make prototypes. Duck minced meat was prepared according to a standard technological scheme. Duck meat is deboned, skimmed and ground into a chopper with a diameter of 2-3 mm.

Also in the formulations of experimental samples was introduced white silver carp. Formulation options are shown in table 2.

Table 2

**Recipes of meatcontaining breads**

<b>Ingredients</b>	<b>Control sample</b>	<b>Test sample</b>
Second-grade beef	70	-
Pork	20	-
Muscovy duck meat	-	30
Minced meat of white carp	-	45
Dry demineralized whey	-	5
Pork fat	8	10
Wheat flour	2	2
Aprored	-	3
Fibra 110	-	2
Melange	-	3
Solt	1,5	1,5
Sodium nitrite	0,0075	0,0075
Spices	0,35	0,35
Sugar	0,1	0,1

In finished products, the nutritional value was determined by the calculation method [26, p. 354], in the experimental samples the content of the FA was determined and the ratio of the FA was calculated according to the recommended daily requirement.

Determination of fatty acids sausages was carried out by gas-liquid chromatography using the automated gas chromatograph Kupol-55 [27, p. 3–10] (Figure 1). To determine the FA a sample was prepared by lipid extraction. A mixture of chloroform-methanol (1:2) and water in a ratio of 30:3 ml was added to 6 g of sample and homogenized the mixture for 2 min. at room temperature.

Homogenized sample was centrifuged, the residue was re-extracted 38 ml. mixtures of chloroform:methanol:water (1:2:0.8) in a homogenizer for 2 min.

The extract was separated by centrifugation; the combined supernatants are diluted in 20 ml of chloroform and 20 ml water. The water-methanol and chloroform phases are separated by centrifugation. The lower layer of chloroform is concentrated on a rotary evaporator at a temperature of 30-350C. The residue is dissolved in 10 ml chloroform.

For fattening, 10 g fat, 3.9 g KOH and 50 ml 96% ethyl alcohol were combined. During 2-3 hours, the mixture was heated with a reflux condenser in an inert gas atmosphere, occasionally shaking the flask. After this time, the mixture was cooled, diluted with distilled water (1:1), neutralized with 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> to pH=7, and acidified to pH=2. The mixture was extracted in 200 ml divalent funnel by sulfuric ether; the procedure was repeated three times in the ratio 1:0.5. The combined ether extracts were washed twice with distilled water, and then dried with anhydrous sodium sulfate.



**Figure 1. Chromatograph Kupol-55 (Russia)**

The extract was concentrated on a rotary evaporator at a temperature not above 400C. After heating in a water bath for 50 min., the extract was diluted with water in a ratio of 1:1. Then hexane extracts were obtained.

The hexane was evaporated on a rotary evaporator to give chromatographically pure methyl esters of fatty acids, which were dissolved in hexane and chromatographed on a Kupol-55 (Russia) chromatograph on a column of SP 2560 (USA) in length 100 m. The absolute error of measurements was determined by Student criterion, the reliable interval  $P=0,95$ , the number of repeats in calculations – 3-4, the number of parallel tests of studied samples – 3.

### 3. Results and discussion

According to the calculations of the nutritional value of meatcontaining sausages with Muscovy duck meat fat content in the recipe-analogue was 23.76 g/100 g of the product, while in the developed sample of the recipe, this index decreased by an average of 10,65-15, 45%.

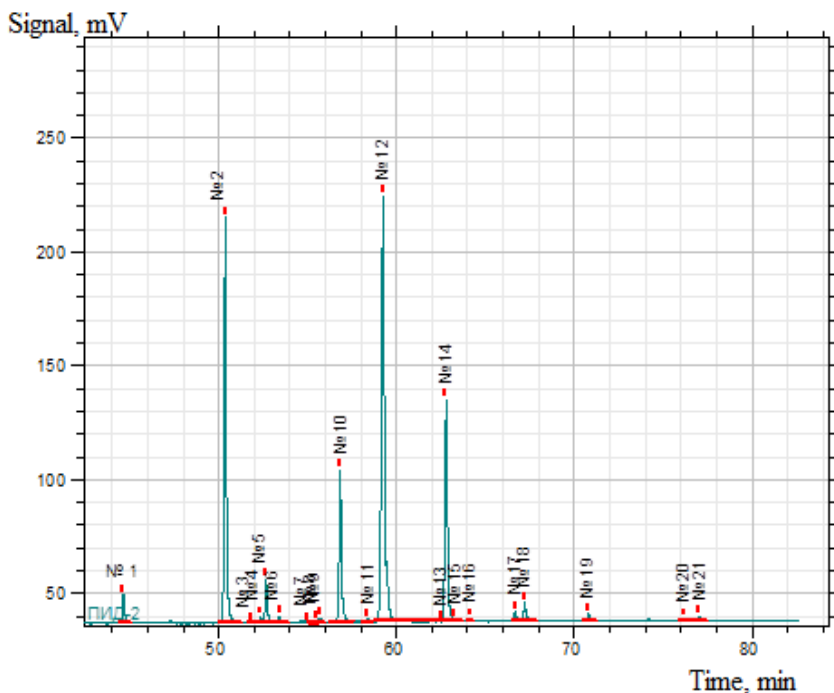
The results of the chromatographic study of the content of FA meatcontaining sausages with Muscovy duck meat are presented in Figure 2 and Table 3.

FA of meatcontaining sausages with Muscovy duck meat is represented mainly by palmitic (24.15%), stearic (10.92%) and myristic (1.47%) acids, among unsaturated ones – oleic (39.78%) , linoleic (14.40%),  $\alpha$ -linolenic (1.65%) acids.

Table 3

**The results of the study of the biological effectiveness  
of fat meat-containing sausages with Muscovy duck meat**

Type of fatty acid	Concentration, g/100 g fat
<b>Saturated fatty acids (SFA)</b>	
Myristic acid (C14:0)	1,47
Palmitic (C16:0)	24,15
Margaric acid (C17:0)	0,48
Stearic acid (C18:0)	10,92
Arachic acid (C20:0)	0,61
<b>Total SFA</b>	<b>37,63</b>
<b>Monounsaturated fatty acids (MUFA)</b>	
Palmitoleic acid (C16:1)	3,05
Oleic acid (C18:1) trans $\omega$ -9	0,24
Oleic acid (C18:1) cys $\omega$ -9	39,78
<b>Total MUFA</b>	<b>43,07</b>
<b>Polyunsaturated fatty acids (PUFA)</b>	
Linoleic acid (C18:2) trans $\omega$ -6	0,12
Linoleic acid (C18:2) cys $\omega$ -6	14,40
$\alpha$ - Linolenic acid (C18:3) $\omega$ -3	1,65
Eicosotrienoic acid (C20:3) $\omega$ -3	0,40
<b>Total PUFA</b>	<b>16,57</b>



**Figure 2. Fatty acids chromatogram of meat-containing sausages with Muscovy duck meat**

FA analysis of meat-containing sausages confirms that this product contains a concentration of oleic acid cys-isomer at the level of 39.78 g/100 g of fat.

The total amount of PUFA was 16.57 g/100 g fat, including a high content of linoleic acid cys and trans configurations (14.52 g/100 g), which belongs to the family  $\omega$ -6.

The FA is balanced in a food product in which the ratio between individual types of FA is: PUFA:MUFA:SFA – 1:6:3. According to nutritionists, the recommended ratio of FA content of the family  $\omega$ -6 (linoleic,  $\gamma$ -linolenic and arachidonic acids) to the family  $\omega$ -3 (linolenic, eicosapentaenic and docosahexaenic acids) in the diet of healthy person should be: (8-10):1, and in medical nutrition – from 3:1 to 5:1 [19, p. 53].

The results of nutritional value studies of cooked sausage with duck meat and silver carp showed that the fat content in the control sample was 27.79 g/100 g of the product, which is 17.6% higher than in the experimental sample.

The amount of energy per 100 g of sausage was 257 kcal, which is related to the ratio of fish and meat raw materials. The energy value of the control sample was 318.14 kcal per 100 g of product, which is 24% higher than in the experimental boiled sausage.

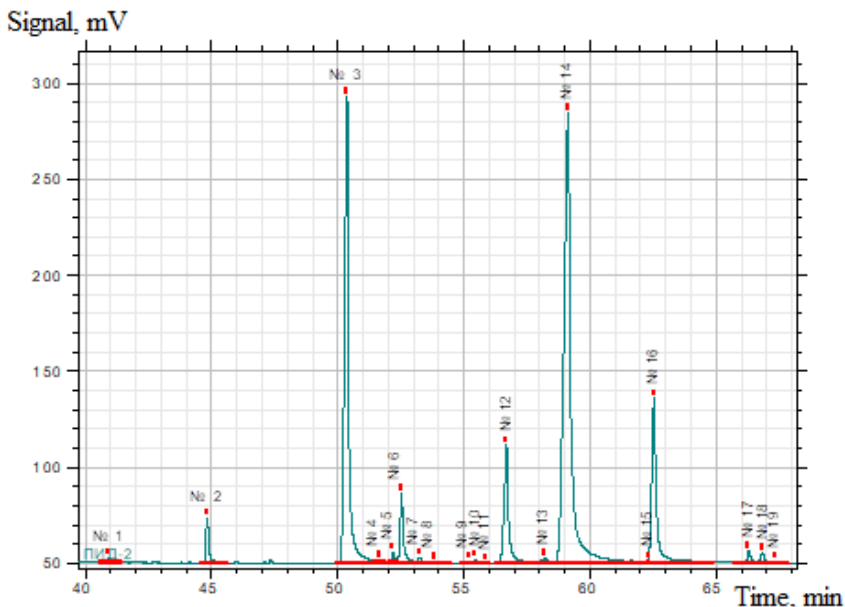
The results of the chromatographic study of the FA content of meatcontaining cooked sausage with Muscovy duck meat and *Carassius gibelio* are presented in Figure 3 and Table 4.

Table 4

**Results of the FA study of meatcontaining cooked sausage  
with duck meat and *Carassius gibelio***

Type of fatty acid	Concentration, g/100 g fat
<b>Saturated fatty acids (SFA)</b>	
Myristic acid (C14:0)	1,73
Palmitic (C16:0)	26,79
Margaric acid (C17:0)	4,43
Stearic acid (C18:0)	7,87
Arachic acid (C20:0)	0,61
<b>Total SFA</b>	<b>41,43</b>
<b>Monounsaturated fatty acids (MUFA)</b>	
Palmitoleic acid (C16:1)	0,49
Oleic acid (C18:1) trans $\omega$ -9	0,47
Oleinic acid (C18:1) cys $\omega$ -9	45,05
<b>Total MUFA</b>	<b>46,01</b>
<b>Polyunsaturated fatty acids (PUFA)</b>	
Linoleic acid (C18:2) trans $\omega$ -6	0,39
Linoleic acid (C18:2) cys $\omega$ -6	11,14
$\alpha$ - Linolenic acid (C18:3) $\omega$ -3	1,14
<b>Total PUFA</b>	<b>12,67</b>

Analyzing the FA composition of meatcontaining cooked sausage with Muscovy duck meat, it confirms that this product contains a concentration of cys-isomer of oleic acid in sausage at the level of 45.05 g/100 g of fat.



**Figure 3. Chromatogram of fatty acid analysis of meatcontaining cooked sausage with duck meat and *Carassius gibelio***

The total amount of PUFA was 12.67 g/100 g fat, including a high content of linoleic acid (11.14 g/100 g), which belongs to the family  $\omega$ -6.

The level of SFA is 41.43% in the fat of the product or g/100 g, among which the dominant is palmitic (26.79 g/100 g fat) and stearic (7.87 g/100 g fat).

In the metabolism of humans involved, first of all, such PUFA: palmitoleic, oleic, linoleic, linolenic. All of these fatty acids were found in meatcontaining cooked sausage with Muscovy duck meat and *Carassius gibelio*.

A sufficient content of essential linoleic FA has been noted in boiled sausage (11.14 g/100 g), which is a precursor of families of long-chain PUFA performing regulatory and plastic functions [28, p. 523; 29, p. 8].

The results of nutritional value studies of meatcontaining bread showed that the fat content of the developed sample decreased compared to the control. In general, the reduction in mass fraction of fat was 24%.



In contrast to the control sample, the test sample contained carbohydrates: lactose, in the amount of 5.14% due to the use of dry demineralized whey; dietary fiber – 2.07% due to flour and soluble fiber Fibra 110 (Germany).

The energy value of the prototype decreased and amounted to almost 264 kcal in 100 g, which is 11.4% less than the recipe-analogue.

Protein in experimental sample increased from 7.8% to 17.47 g/100 g.

The results of the chromatographic study of the content of FA of meat-containing bread with Muscovy duck meat and silver carp are presented in Figure 4 and Table 5.

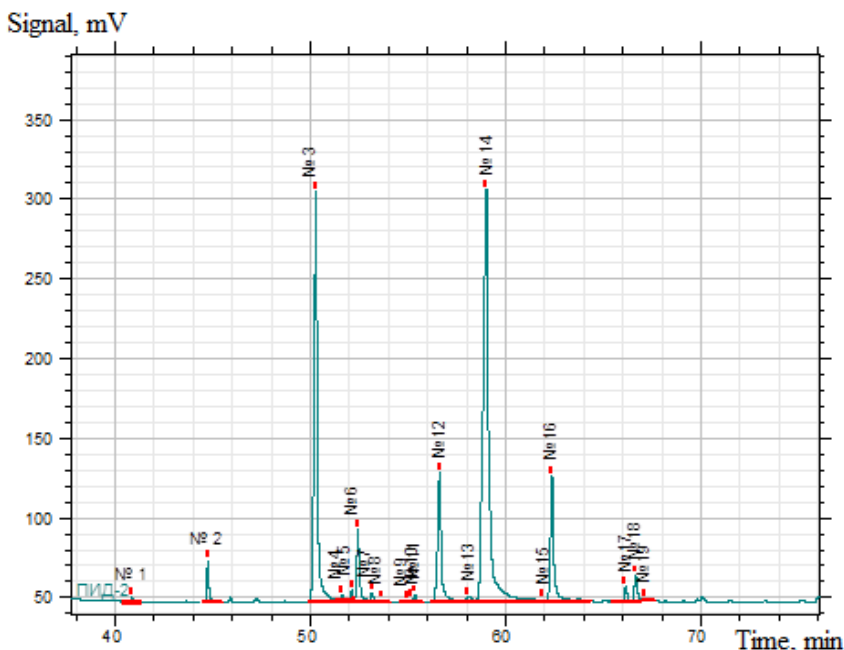
Table 5

**Results of a FA study of meat-containing bread  
with Muscovy duck meat and silver carp**

Type of fatty acid	Concentration, g/100 g fat
<b>Saturated fatty acids (SFA)</b>	
Myristic acid (C14:0)	1,73
Palmitic (C16:0)	24,94
Margaric acid (C17:0)	4,53
Stearic acid (C18:0)	9,58
Arachic acid (C20:0)	1,68
<b>Total SFA</b>	<b>42,46</b>
<b>Monounsaturated fatty acids (MUFA)</b>	
Palmitoleic acid (C16:1)	0,77
Oleic acid (C18:1) trans $\omega$ -9	0,71
Oleic acid (C18:1) cys $\omega$ -9	45,48
<b>Total MUFA</b>	<b>46,96</b>
<b>Polyunsaturated fatty acids (PUFA)</b>	
Linoleic acid (C18:2) trans $\omega$ -6	0,17
Linoleic acid (C18:2) cys $\omega$ -6	8,61
$\alpha$ - Linolenic acid (C18:3) $\omega$ -3	1,07
<b>Total PUFA</b>	<b>9,85</b>

According to the table, the total level of SFA is lower than the total level of unsaturated FA. The total amount of SFA was 42.46 g/100 g fat, whereas unsaturated was 56.81%.

Monoene FA were found in the amount of 46.96% and polyene in the number of 9.85%.



**Figure 4. Chromatogram of fatty acid analysis of meatcontaining bread with Muscovy duck meat and silver carp**

It should be noted that the trans isomers of the FA are discovered in minimal quantities and only for two FA: oleic – 0.71 g/100 fat and linoleic – 0.17%.

The presence of trans isomers of unsaturated FA in food has long been associated with a negative impact on the body. It is proved that trans – FA increase the probability of cardiovascular diseases [30, p. 7].

Among the omega-6 acids, linoleic acid prevailed in the sample, the average content of which in the cys form was 8.61%; also found  $\alpha$ -linolenic acid in the amount of 1.07 g/100 g of fat.

The biological efficiency of food lipids is characterized by the balance and level of FA compliance with the body's physiological needs in accordance with current nutritionists' recommendations.

A number of scientific organizations and governments in some countries have recognized the need to increase the consumption of FA family  $\omega$ -3 in

the diet. Summarizing the scientific data and recommendations of experts from different countries of the world, we can conclude that common to all the recommendations is the emphasis on the need for daily consumption of  $\omega$ -3 FA in the amount of 1.0-2.0 g per day. For the greatest biological effect, the proposed ratio of  $\omega$ -3/ $\omega$ -6 should be from 1:4 to 1:10 [31, p. 23; 32, p. 35; 33, p. 300; 34, p. 384; 35, p. 16; 36, p. 2294].

Indexes of biological efficiency of cooked sausages lipids in the compared with the standard are shown in table 6.

Table 6

**Indexes of biological efficiency  
of meatcontaining cooked sausages lipids**

Indexes of biological efficiency	Samples			
	Standard [37]	Meatcontaining sausages	Meatcontaining boiled sausage	Meatcontaining bread
$\omega$ -3 fatty acid content, g/100 g of product	[37]	0,50	0,26	0,21
The level of satisfaction of the recommended daily $\omega$ -3 PUFA requirement, %	1,5 r (100 %)	32,47	17,48	14,27
Linoleic fatty acid content, g/100 g of product	11,3-16,3 r	3,42	2,56	1,72
The satisfaction level of the recommended daily requirement for linoleic acid, %	13,8 r (100 %)	30,27	22,67	15,25
$\alpha$ -linolenic fatty acid content, g/100 g of product	1,1-1,6 r	0,39	0,26	0,21
The satisfaction level of the recommended daily requirement for $\alpha$ -linolenic acid, %	1,4 r (100 %)	28,00	18,73	15,29
$\omega$ -6 fatty acid content, g/100 g of product	5,6	3,42	2,56	1,72
The ratio of fatty acids $\omega$ -3/ $\omega$ -6	1:5-1:10	1:7	1:9,8	1:8

It has been experimentally found that lipids of meatcontaining cooked products are characterized by high values of biological efficiency. It is experimentally determined that the high content of  $\omega$ -3 PUFA in the developed cooked products ranges from 0.21 to 0.50 g per 100 g, which allows to provide from 14.27 to 32.47% of the recommended daily requirement.

This allows considering meatcontaining cooked products with duck meat and fish raw materials as a source of  $\omega$ -3 PUFA for inclusion in the daily diet of an adult.

Considering the available scientific data on a wide range of clinical and pharmacological effects of  $\omega$ -3 PUFA (hypotriglyceridemic, antiatherogenic, antiarrhythmic, anti-inflammatory and hypotensive), meatcontaining cooked products with Muscovy duck meat and freshwater aquaculture can be recommended for use in production food for healthy nutrition.

It is shown that the ratio of the concentration of linoleic to linolenic FA is much less than the recommended one, which is the reason for the predominance of linolenic acid, the deficiency of which is characteristic of the diet of the inhabitants of Ukraine [3, p. 7].

The satisfaction level of the recommended daily requirement for linoleic acid at the expense of meatcontaining products of the cooked group is from 15,25-30,27%, and for linolenic – 15,29-28%.

That is, consuming 100 grams of meatcontaining cooked sausages with duck meat can satisfy a person's need for  $\omega$ -3 fatty acids by 28% and for  $\omega$ -6 by 30.27%.

FA ratio  $\omega$ -3/ $\omega$ -6 ranks within 1:7 – 1:9,8, which corresponds to the recommended physiological standards of nutrition for a healthy person.

#### 4. Conclusions

1. Studies have confirmed that FAC of cooked meat products are characterized by a high content of unsaturated, including essential, FA in their composition – linoleic, oleic, linolenic

2. The high content of monounsaturated C18:1  $\omega$ -9 (oleic) FA was experimentally established in all products developed – 43.07-45.48 g/100 g fat. It is proved that the significant content of  $\omega$ -3 PUFA, deficiency of which is characteristic for the nutrition of the Ukraine's population, in the developed meatcontaining products of the cooked group (0.21-0.39 g/100 g of product) can satisfy the recommended daily requirement for essential FA for 28%.

3. The determination of the content of FA trans-isomeric form showed that their concentration is negligible and is at the level of 0.12-0.71 g/100 g of fat at the maximum allowable concentration of trans-isomers in the combined fats is not more than 8%.

4. It is experimentally determined that the ratio between individual families FA  $\omega$ -3/ $\omega$ -6 in the developed products is from 1:7 to 1:9,8 at the recommended physiological norms of the ideal fat composition in the diet 1:5-1:10. That is cooked meatcontaining products made with the combination of Muscovy meat and freshwater aquaculture meat can be recommended for healthy nutrition.

5. The above results suggest that the use of the proposed recipe solutions of meat-containing combined products cooked group increases their nutritional value in terms of biological efficiency.

6. It has been found that lipids of meatcontaining cooked products meet the optimum values for the most of the calculated biological efficacy indicators. Taking into account the systematized data on a wide range of clinical and pharmacological effects of  $\omega$ -3 and  $\omega$ -6 PUFA, it is possible to consider meatcontaining combined products of cooked group based on duck meat and freshwater aquaculture as a source of essential FA in the human diet and use them for recovery of healthy lipid balance disorders in the diets of the modern Ukraine's population.

### References:

1. Pasichnyi V.M. (2002). Ranhove otsiniuvannia kombinovanykh miasoproduktiv. *Naukovi pratsi NUKhT*, 11, 77–80.
2. Peshuk L.V., Radzyevskaya Y.G., Kyshhenko V.A., Levchuk Y.V. (2011). Sravnytelnyj analiz zhyrnokyslotnogo sostava tradyconnyh y ekzotycheskyh vydiv syrya. *Zhurnal xromatografichnogo tovarystva*, t. XI, 3,4, 42–48.
3. Smolyar V.I. (2012). Stan faktychnogo harchuvannya naselennya nezalezhnoyi Ukrainy. *Problemy xarchuvannya*, 1–2, 5–9.
4. Levyczkyj A.P. (2002). Idealnaya formula zhyrovogo pytanya. Odessa: NPA "Odesskaya byotehnologiya", 61 s.
5. Smolyar V.I. (2006). Koncepciya idealnogo zhyrovogo harchuvannya. *Problemy harchuvannya*, 4, 14–24.
6. Subbotina M.A. (2009). Fiziologicheskie aspektyi ispolzovaniya zhirov v pitanii. *Tehnika i tehnologiya pischevyih proizvodstv*. V. 4, 8–13.
7. Hansen A. (1987). Lipid in modern nutrition. N.-Y.; Raven Press, 248 p.
8. Jones P., Rideout T. (2012). Modern Nutritionin Health and Disease (Lipids, Sterols, and Their Metabolites) in book *Modern Nutritionin Health and Disease*, Wolters Kluwer Health, 65–87.

9. Pubchem.5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid C20H32O2 -PubChem.
10. Horrocks L.A., Yeo Y.K. (1999). Health benefits of docosahexaenoic acid (DHA). *Pharmacological Research*. T. 40(3), 211–225.
11. Riediger N.D., Othman R.A., Suh M. et al. (2009). A systematic review of the roles of the n-3 fatty acid in heart disease. *J. Am. Diet Assoc.* 109(4): 668–679. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jada.2008.12.022>
12. Fedorova, D. (2017). Doslidzhennya zhyrnokyslotnogo skladu lipidiv suhyh ryboroslynnyh napivfabrykativ. *Food Science and Technology*, 11(3), 61–70. <https://doi.org/10.15673/fst.v11i3.608>
13. Benatti P., Peluso G., Nicolai R., Calvani M. (2004). Polyunsaturated Fatty Acids: Biochemical, Nutritional and Epigenetic Properties. *Journal of the American College of Nutrition*, 23(4), 281–302.
14. Sprecher H, Chen Q, Yin FQ. (1999). Regulation of the biosynthesis of 22:5n-6 and 22:6n-3: a complex intracellular process. *Lipids*, 34, 153–156.
15. Lauritzen L., Hansen H.S., Jorgensen M.H., Michaelsen K.F. (2001). The essentiality of long-chain n-3 fatty acids in relation to development and function of the brain and retina. *Prog Lipid Res*, 40, 194.
16. James M.J., Gibson R.A., Cleland L.G. (2000). Dietary polyunsaturated fatty acids and inflammatory mediator production. *Am J Clin Nutr*, 71, 343–348.
17. Smolyar V.I. (2011). Zakony racionalnogo harchuvannya v suchasniy nutriciologii. *Problemy harchuvannya*, 1(2), 5–13.
18. Yvankyn A.N. (2007). Zhyry v sostave sovremennykh myasnykh produktov. *Myasnaya industriya*, 6, 8–13.
19. Hughes CL, Dhiman TR: (2002). Dietary compound sin relation to dietary diversity and human health. *J Med Food*, 5, 51–68.
20. Etherton R., Taylor D.L., Poth S. Yu, Huth P., Moriarty K., Fishell V., Hargrove R., Zhao G., Etherton T. (2000). Polyunsaturated fatty acids in the food chain in the United States. // *Am. J. Clin. Nutr.* 71. P. 179–188. doi: 10.1093/ajcn/71.1.179S
21. Matasar Y. i dr. (2002). Sotsialnodemograficheskaia kharakterystyka i faktycheskoe pytanye zhenshyn, prozhyvayushykh v Ukrainie. *Liky Ukrainy*, 11, 49–54.
22. Bozhko, N., Pasichnyi, V., Bordunova, V. (2016). Meat-containing cooked sausage containing the meat of a duck. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 18(2), 143–146. URL: <https://doi.org/10.15421/nvlvet6829>
23. Bozhko N.V., Tishhenko V.I., Pasichnyi V.M. ta in. (2017). Rozrobka receptury sardelok iz myasa muskusnoyi kachky. *Progresywni tehnika ta tehnologiyi harchovykh vyrobnytstv restorannogo hospodarstva i torgivli*. Vyp. 2(26), 94–104.
24. Bozhko, N.V., Tishhenko, V.I., Pasichnyi, V.M., Konyk, M.V. (2019). Rozrobka receptury varenykh kovbas iz myasom vodoplavnoyi ptyci ta malocinnoyi stavkovoyi ryby. *Naukovy visnyk PUET: Technical Sciences*, 1(85), 17–24.
25. Bozhko, N., Tishchenko, V., Pasichnyi, V., Yuschko, M., Zhukova, Y., Popova, E. (2018). Study of functional and technological indices of meat-containing loaf with Muscovy duck meat and white carp. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 20(85), 19–23. URL: <https://doi.org/10.15421/nvlvet8504>

26. Antypova L.V., Glotova Y.A., Rogov Y.A. (2001). *Metody issledovanya myasa y myasnyh produktov*. Moskva, 576 s.

27. DSTU ISO 15885/IDF 184:2008 (2011). *Zhyr molochnyj. Vyznachennya zhyrnokyslotnogo skladu metodom gazoridynnoyi hromatografii. Metody ekstrahuvannya lipidiv ta liporozchynnyh spoluk*. Kyiv, 12 s.

28. Simopoulos, A. (1989). Summary of the NATO advanced research workshop on dietary omega-3 and omega-6 fatty acid: biological effects and nutritional essentiality. *The Journal of Nutrition*. 119, 521–528.

29. Fats and oils in human nutrition: (2010). Report of an expert consultation: FAO food and nutrition paper. Rome: FAO. 169 p.

30. Bessonov V.V., Zajceva L.V. (2016). Transizomery zhyrnyh kyslot: rysky dlya zdorovya i puty snyzhennya potreblennya. *Voprosy pytannya*, 85(3), 6–17. doi: 10.24411/0042-8833-2016-00030

31. Fats and oils in human nutrition: (1994). Report of a Joint FAO/WHO Expert Consultation: Fat and Nutrition paper 57/ FAO/WHO. Rome: FAO. 147 p.

32. Dietary Reference Values for Food Energy and Nutrients for the United Kingdom: (1991). Report of the Panel on Dietary Reference Values of the Committee on Medical Aspects of Food Policy/ Report on Health and Social Subjects. London: 41. 210 p.

33. Simopoulos, A.P. (1999). Workshop on the Essentiality of and Recommended Dietary Intakes for Omega-6 and Omega-3 Fatty Acids. *Asia Pacific Journal of Clinical Nutrition*, 8, 300–301. doi: 10.1046/j.1440-6047.1999.00123.x

34. Ambroise Martin, coordonnateur général; coordonnateurs, Véronique Azaïs-Braesco, Jean-Louis Bresson, Charles Couet. [et al.]. (2016). *Apports nutritionnels conseillés pour la population française CNERNA-CNRS AFSSA, Agence française de sécurité sanitaire des aliments*. Paris: Tec&Doc, 591 p.

35. Letter regarding dietary supplement health claim for omega-3 fatty acids and coronary heart disease (2000). U. S. Food and Drug Administration Center for Food Safety and Applied Nutrition. Office of Nutritional Products, Labeling, and Dietary Supplements. P. 1–34.

36. AHA dietary Guidelines, revision (2000). A statement for health care professionals from the nutrition committee of the American Heart Association. *Circulation* 2000. 102(18), 2284–99.

37. Joint FAO/WHO Expert Consultation on Fats and Fatty Acids in Human Nutrition (2009). *Annals of Nutrition & Metabolism*, 55(1-3), 1–308.

**IMPROVEMENT OF TECHNICAL AND ECONOMIC  
INDICATORS OF TOOL PREPARATION  
AT MANUFACTURING ENGINEERING PRODUCTION  
BY THE IMPROVEMENT OF REGULATORY BASIS**

**ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ  
ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ ПІДГОТОВКИ МАШИНОБУДІВНОГО  
ВИРОБНИЦТВА ШЛЯХОМ ВДОСКОНАЛЕННЯ  
НОРМАТИВНОЇ БАЗИ**

**Viliam Zaloga<sup>1</sup>**

**Yuliia Denysenko<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-54>

**Abstract.** One of the most important areas of activity of manufacturing engineering production is its tool preparation (TP), the purpose of which is to provide all (without exception) processes that accompany the production and sale of products with the necessary tools and equipment. Therefore, improving the regulatory framework for the management and quality assessment of TP is in the context of the functioning of information technology is an urgent scientific and applied task, the solution of which will improve the efficiency of production, including increasing reliability, reducing costs and reducing the time to prepare the engineering enterprise in the field of tooling. In today's market relations, an efficient enterprise and competitive advantages can only be provided by an efficient system of managing its production activity based on the widespread use of modern information technologies, which is an important source of improving the effectiveness of the decisions made, productivity and competitiveness of production. The aim is to increase the efficiency of the system of TP of engineering enterprises by improving its regulatory support on the basis of forecasting its technical and economic indicators (TEI) in the conditions

---

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of Department of Manufacturing Engineering, Machines and Tools,  
Sumy State University, Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer,  
Sumy State University, Ukraine



of use of modern information technologies. One of the main tasks of the research is to develop mechanisms and toolkits to create a model of TP quality management in the context of information technologies, based on the application of forecasting and optimization methods. The object of the research is the quality management system of the tool preparation. The subject of the research is to ensure regulatory of TP quality management in the conditions of introduction of information technologies. Theoretical studies are based on the use of TQM principles in managing the quality of the TP information system (ISTP). Fundamental provisions of the basics of the theory of quality management, the theory of decision making, quality-metry and others were used to solve scientific problems. For the first time, the model of information system of TP quality management at engineering enterprise is proposed on the basis of the analysis of the toolkits adopted in CALS technologies at each stage of the life cycle of the corresponding products, which allows to identify information flows using modern information technologies. The features of TP of machine-building enterprises, which became a prerequisite for the development of common methods in making decisions about the quality of its processes, are defined in the paper. The paper presents a unified model of decision making in the field of quality of processes of ISTP with a dimensionless scale of evaluation, which allows to evaluate processes under one of two conditions, depending on the TEI of processes and the cost of quality of ISTP processes. Taking into account the requirements of ISTP, the TEI system was proposed on three grounds of optimality and the classification of costs for the quality of ISTP processes was developed, which significantly improves the efficiency of its functioning. The algorithm of introduction of ISTP in an engineering enterprise is scientifically substantiated and developed. It is shown that the proposed regulatory and methodological support allows for each engineering enterprise to develop a quality management system of ISTP taking into account the specificity of the enterprise, the totality of technological processes, the nature of technological equipment, and other production features.

### 1. Вступ

В умовах ринкових відносин сучасному машинобудівному підприємству ефективне функціонування й конкурентні переваги може забезпечити тільки ефективна система управління його виробничою діяль-

ністю. Сьогодні підприємство саме повинне визначати й прогнозувати, вміти швидко, а головне правильно реагувати на будь-які зміни в зовнішньому й внутрішньому середовищі, і відповідно до них корегувати свою діяльність. Ускладнення виробництва, супроводжуване ростом складності розв'язуваних завдань і підвищенням втрат від неточного й несвоєчасного прийняття рішень, висуває необхідність удосконалювання методів оперативного управління виробництвом.

У комплексі процесів виробництва на сучасних машинобудівних підприємствах важливу роль відіграє інструментальна підготовка виробництва, тому що від якості й прогресивності інструмента й оснащення, своєчасного забезпечення ними робочих місць залежить і ефективність діяльності підприємства в цілому. Це пов'язане з тим, що витрати на науково-технічне оснащення в масовому виробництві досягають 25-30% ціни устаткування, у великосерійному – 10-15%, у дрібносерійному й одиничному – у межах 5%. Частка витрат на оснащення в собівартості досягає відповідно 4, 6, 8 і 15%. Розмір капіталовкладень в інструмент і оснащення коливається від 15 до 40% від суми коштів підприємства.

Крім того, трудомісткість проектування й виготовлення комплексу необхідного інструменту та технологічного оснащення (ТО) в загальних витратах на технологічну підготовку виробництва нових виробів машинобудівної галузі становить до 80% [1].

Специфіка ІПВ обумовлюється тим, що на сучасних підприємствах застосовується оснащення десятків і сотень тисяч найменувань, що у свою чергу в сотні раз перевищує номенклатуру виробів, що випускаються. В інструментальному господарстві задіяно безліч відділів і цехів, які займаються проектуванням, виробництвом, закупівлею, ремонтом і відновленням оснащення, доставкою її на робоче місце тощо. Це спричиняє складності як у забезпеченні оснащенням основного виробництва, так і в моніторингу процесів системи ІПВ, особливо в умовах оперативного управління основним виробництвом.

Наведені дані дають уявлення про важливість управління процесами ІПВ для досягнення ефективної роботи машинобудівного підприємства.

Таким чином, керівництво сучасних підприємств, перебуваючи в пошуку нових підходів у управлінні й підвищенні якості прийнятих рішень, натрапляє на граничні можливості застосовуваних методів і алгоритмів.

Інструментальне виробництво в наш час є одним із основних споживачів ринку CAD/CAM-систем і послуг (до 30%) [2, с. 23]. Це положення вимагає підвищеного уваги й створює передумови для використання одного з перспективних шляхів – застосування інформаційних технологій.

Сучасні інформаційні технології є важливим джерелом підвищення ефективності прийнятих рішень, продуктивності й конкурентоспроможності. Їхнє застосування пов'язане з одержанням і обробкою інформації про внутрішні матеріальні потоки, характеристики виробничих процесів, контролі ходу виробництва, випуску готової продукції, вантажних відправлень, параметрах замовлень і інших характеристиках.

Тому вдосконалення нормативного забезпечення управління й оцінки якості ППВ в умовах функціонування інформаційних технологій є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого забезпечить підвищення ефективності виробництва, включаючи підвищення надійності, зниження витрат і скорочення часу на підготовку машинобудівного підприємства з питань інструментального забезпечення.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності системи інструментальної підготовки виробництва машинобудівних підприємств шляхом удосконалення її нормативного забезпечення на основі прогнозування її техніко-економічних показників (ТЕП) в умовах використання сучасних інформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано і вирішено наступні **задачі дослідження**:

- проаналізувати сучасний стан нормативного забезпечення процесів управління й оцінювання якості ППВ та впровадження сучасних інформаційних технологій при інструментозабезпеченні машинобудівних підприємств;
- проаналізувати сучасні методи прогнозування й розробити рекомендації щодо їх раціонального вибору для управління якістю процесів життєвого циклу ППВ;
- розробити механізми й інструментарії створення моделі управління якістю ППВ в умовах інформаційних технологій, що базуються на застосуванні методів прогнозування й оптимізації;
- розробити принципи побудови нормативного забезпечення якості процесів ППВ на основі запропонованої прогнозно-оптимізаційної моделі управління якістю;

– провести апробацію запропонованих рекомендацій і розроблених методик у виробничих умовах.

**Об’єкт дослідження:** система управління якістю процесів інструментальної підготовки виробництва.

**Предмет дослідження:** нормативне забезпечення управління якістю ІПВ в умовах впровадження інформаційних технологій.

**Методи дослідження:** Теоретичні дослідження базуються на використанні принципів TQM при управлінні якістю інформаційної системи ІПВ (ІС ІПВ). Для вирішення наукових завдань були використані фундаментальні положення основ теорії управління якістю, теорії ухвалення рішень, кваліметрії, технології машинобудування й інструментального виробництва. Для аналізу, збору та обробки інформації використовувалися методи статистичного аналізу і експертних оцінок.

Достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджена експериментальними дослідженнями, які реалізувалися за допомогою існуючих методів обробки статистичних даних, кваліметрії та сучасного програмного забезпечення.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в удосконаленні наукових підходів до управління якістю інструментальної підготовки виробництва промислових підприємств в умовах сучасних інформаційних технологій. Це базується на наступних наукових розробках.

Вперше:

– на основі узагальнення вітчизняного та зарубіжного досвіду з управління якістю продукції і процесів машинобудівних підприємств та логіко-структурного аналізу отриманої інформації запропонована система ТЕП ІПВ, яка дозволяє організувати ефективну систему збору, опрацювання й ефективного використання техніко-економічної інформації у конкретних виробничих умовах;

– запропоновано модель інформаційної системи управління якістю інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства на основі аналізу прийнятих у CALS-технологіях інструментаріїв на кожному етапі життєвого циклу відповідної продукції, яка дозволяє ідентифікувати інформаційні потоки з використанням інформаційних технологій;

– запропоновано узагальнений показник інформаційної системи ІПВ, який дозволяє оцінити результативність та ефективність функціо-

нування даної системи у відповідності з виконанням вимог міжнародних стандартів на системи управління (ISO 9001, OHSAS 18001 і т.д.);

Одержали подальший розвиток:

- підхід до класифікації витрат на якість ІС ІПВ машинобудівного підприємства, що дозволило з урахуванням запропонованої типової моделі управління якістю ІС ІПВ в умовах функціонування інформаційних технологій виділити статті витрат на якість процесів ІПВ та розробити універсальну класифікацію витрат на якість, підприємств машинобудівної галузі;

- підхід до побудови шкал оцінювання ТЕП, що дозволяє шляхом застосування нечітких множин мати можливість узгоджувати неоднорідні ТЕП ІС ІПВ в умовах використання єдиного інформаційного простору;

- модель вибору раціональних рішень з управління якістю інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства, яка дозволяє на основі використання теорії оптимізації на графі прогнозувати витрати на інструментальне забезпечення основного виробництва з урахуванням виконання обмежень за рівнем якості технологічного оснащення та інструменту по розташовуваним матеріальним і тимчасовим ресурсам в умовах впровадження інформаційних технологій (трирівнева система прийняття раціональних рішень).

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропонований коефіцієнт сталого розвитку процесів ІС ІПВ, який базується на використанні статистичних даних, дозволяє врахувати фактори, що впливають на ефективне функціонування ІС ІПВ.

Розроблені: «Типова методика прийняття рішень з управління процесами якістю ІС ІПВ багатомономенклатурних машинобудівних підприємств», СОУ «Експлуатація технологічного оснащення в умовах функціонування інформаційних систем», а також СОУ «Інструментальна підготовка виробництва в інформаційній системі управління», які є універсальними нормативними документами та базуються на використанні принципів TQM з врахуванням основних засад функціонування CALS-технологій.

Результати досліджень використано для вдосконалення процесу управління якістю процесів ІС ІПВ на ПАТ «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання», ВАТ НВП «Насостехкомплект» та показників

навчального процесу СумДУ при розробці навчальних дисциплін: «Системи управління якістю» та «Управління інформаційними зв'язками» для студентів спеціальності «Якість, стандартизація та сертифікація».

## **2. Сучасний стан проблеми управління якістю процесів ППВ**

Огляд сучасних підходів до створення та використання систем ППВ та ІС ППВ в Україні досить детально викладено в роботах О.В. Івченко [3, с. 15-38; 4, с. 239], І.В. Костюка [5, с. 10], О.Д. Динник [6, с. 65] та інших. Їх вивченням займаються ряд вчених, наприклад, А.І. Левін [7, с. 612]. Інформаційному забезпеченню на промислових підприємствах присвячені роботи В.О. Вайсмана [8, с. 10], В.А. Окулесьського [9, с. 7], Н.О. Чорної [10, с. 97] та інших. На основі аналізу праць вказаних та інших вчених, а також нормативного забезпечення інформаційних систем управління підприємством визначено сучасний стан проблеми управління ППВ на вітчизняних підприємствах.

У ході проведених досліджень було встановлено, що сучасні інформаційні системи розглядають ППВ, як матеріальний ресурс, і майже не враховують, що на вітчизняних машинобудівних підприємствах хоч постійно і зростає питома вага покупних інструментів та інструментального оснащення, ще значну частину інструментального господарства займає інструмент і оснащення власного виготовлення. Отже, у такому випадку можуть бути застосовні принципи управління підприємством в цілому, тобто модулі CALS-технологій [11; 12, с. 58], що стосуються кожного етапу ЖЦ продукції й забезпечення її якості, враховуючи вказану специфіку ППВ.

Крім того, вимоги й принципи до систем ERP і інших інструментів CALS-технологій, як правило, не забезпечують аналізу можливих ризиків і попередження збоїв. Тому, одним з напрямків по поліпшенню діяльності машинобудівного підприємства, пов'язаної з інструментозабезпеченням, є розробка нормативного забезпечення системи ППВ на основі впровадження інформаційних технологій при можливості застосування на їх базі методів прогнозування й оптимізації відповідних процесів в системі ППВ.

В розвиток методологій прогнозування якості процесів зробили вклад такі вчені, як: Дж. Бокс та Г. Дженкінс [13, с. 18], І.В. Антохонова [14, с. 8], Дж. Ханк, А. Райз та Дін Уічерн [15, с. 83] та інші. На основі праць зазначених вчених та узагальнення світового та вітчизняного досвіду представлена класифікація методів прогнозування по ступеню формалізації.

Також аналіз сучасних тенденцій у управлінні підприємством показав, що нормативне забезпечення системи ІПВ в умовах застосування сучасних досягнень в області інформаційної підтримки виробництва повинне не тільки забезпечувати вимоги й принципи стандартів CALS-технологій, але й враховувати вимоги й принципи стандарту ДСТУ EN ISO 9001:2018. Впровадження цих стандартів спонукає сучасні підприємства України чітко контролювати витрати на підприємстві. Важливим елементом системи управління витратами на підприємстві є аналіз і оцінка витрат на якість його процесів. Тому в розділі були проаналізовані підходи до визначення витрат на якість, що були запропоновані Г.Г. Азгальдовим [16, с. 16, 54], Дж. Джураном, Ф.Б. Кросбі [17; 18, с. 17], А.В. Фейгенбаумом [19, с. 18] та ін. Узагальнивши вітчизняний та зарубіжний досвід в управлінні витратами на якість були виділені основні системи класифікації витрат на якість.

Таким чином, здійснений аналіз сучасних інформаційних систем управління, методів прогнозування та систем класифікацій витрат на якість вказує на актуальність розробки методів, алгоритмів та методик управління ІПВ, які б були застосовні на всіх процесах життєвого циклу системи, та враховували усі значущі на певному етапі показники функціонування процесів.

### **3. Розроблення моделі управління якістю ІПВ**

Для організації ефективного управління процесами ІПВ необхідно обов'язково розробляти, впроваджувати й підтримувати інформаційну систему управління якістю ІПВ. Загальна модель інформаційної системи управління ІС ІПВ, яка розроблена відповідно до вимог ДСТУ EN ISO 9001:2018 (рис. 1а), поєднує процеси життєвого циклу інструменту та оснащення, управління ресурсами ІПВ, виміру, її аналізу й поліпшення (як на тактичному, так і на оперативному рівнях) у єдиному інформаційному просторі. Разом з тим, для сучасних багатоменклатурних промислових підприємств, особливо машинобудівного профілю, з метою підвищення ефективності інструментозабезпечення нагальним є питання розробки та впровадження системи управління ІПВ підприємства на основі процесного підходу. В роботі запропоновані концептуальна модель інформаційної системи управління якістю ІПВ (ІС ІПВ) саме з позиції процесного підходу, яка представлена на

рис.1б у вигляді трьох взаємозалежних моделей систем ІПВ: організаційної, інформаційної та управління якістю.

Окрім створення та впровадження систем управління різними видами діяльності (системи управління якістю, системи управління охороною навколишнього середовища та ін.) є доцільним розроблення системи техніко-економічних показників саме для ІС ІПВ (далі – ТЕП) [20, с. 62; 21, с. 79].

Ці ТЕП повинні бути: значущі, пов'язані з іншими показниками в системі управління виробництвом основної продукції, прості та вимірні та щоб їх можна було порівнювати з аналогічними показниками інших підрозділів підприємства.

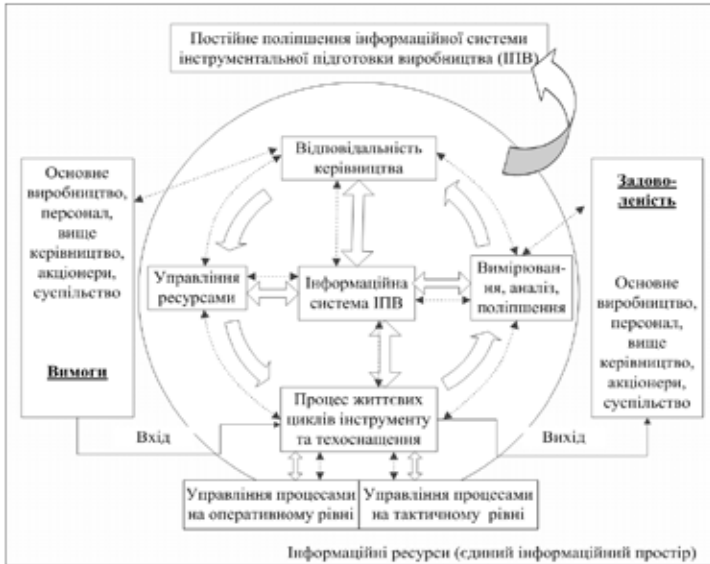
Тому в роботі запропоновано розподіл ТЕП ІС ІПВ за видами діяльності: організаційно-економічні, виробничі, управління якістю, екологічні та соціальні.

Окрім видів діяльності зазначені ТЕП рекомендовано класифікувати за рівнем управління процесами ІС ІПВ – ТЕП організаційного та тактичного рівнів, – а також за результируючим оптимальним значенням ТЕП: відносні, що знаходяться в інтервалі 0 – 1 (оптимальне значення 1); ТЕП, що визначаються згідно логічних суджень експертів.

Впровадження міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO 9001:2018 і побудова промислового виробництва на базі процесного підходу в умовах функціонування інформаційних технологій спонукає сучасні підприємства улюбий необхідний час контролювати витрати фінансових ресурсів на підприємстві. Тому, одними із важливих елементів створюваної системи ТЕП на підприємстві є процеси аналізу і оцінки витрат на якість ІПВ. Чіткий та повний зміст запропонованої класифікації забезпечує основу аналізу та моделювання інформаційних потоків ІПВ, що є дієвим інструментом з реалізації циклу Джурана-Демінга. Крім того, необхідність класифікації витрат обумовлена неоднорідністю різних видів витрат за складом, змістом, роллю у виробничому процесі, зв'язку з обсягом виробництва та ін. Показано, що класифікацію витрат на якість процесів ІПВ, побудовану на вказаних принципах, можна ефективно використовувати в управлінні ІС ІПВ.

Розроблена система класифікації витрат на якість процесів ІС ІПВ базується на принципах: істотності і стабільності; стандартизації; пристосованості; причинно-наслідкового зв'язку.





←.....→ – Інформаційні потоки  
 ↔ – Діяльність, що створює надану вартість

а)



б)

Рис. 1. Загальна модель інформаційної системи управління ІС ІПВ (а) та концептуальна модель системи управління ІПВ в умовах застосування інформаційних технологій (б)

Для проектування класифікації запропоновано використовувати метод ранжування експертних оцінок, який грає роль з'єднувальної ланки між умовами реального процесу ІС ІПВ та оптимальною системою класифікації витрат. На рис. 2 представлений фрагмент класифікація витрат, розробленої на основі проведених досліджень з опитування восьми експертів за розробленою у роботі методикою.

Однією з переваг запропонованої моделі ІС ІПВ, яка відповідає вимогам стандартів CALS-технологій, є створення єдиного інформаційного простору, що значно спрощує обмін інформацією, а також збір необхідних даних. Крім того, системи управління, що базуються на принципах CALS-технологій дозволяють створювати великі масиви вихідних даних в найкоротші строки. Інформація, що отримується про ТЕП з баз даних ІС ІПВ, є відмінною основою для прийняття стратегічно важливих для керівників рішень в області якості. В основі прийняття рішення пропонується цільова функція оптимізації – функція визначення коефіцієнта сталого розвитку ІС ІПВ –  $K_{ст}$ .

Цільова функція має вигляд:

$$K_{ст} = Q_{я} \cdot \sum_{j=1}^m \sqrt[6]{\left( \frac{B_{\bar{6}}}{\sum_{j=1}^m B_j} \right)^{\gamma_1}} \cdot K_{oj}^{\gamma_2} \cdot K_{ej}^{\gamma_3} \cdot K_{aj}^{\gamma_4} \cdot K_{ej}^{\gamma_5} \cdot K_{cj}^{\gamma_6} \rightarrow \min \quad (1)$$

де  $Q_{я}$  – показник якості процесу ІС ІП;  $B_j$  – витрати на якість процесів ІПВ;  $B_{\bar{6}}$  – базовий показник витрат на якість процесів ІПВ;  $K_o$ ,  $K_{\bar{e}}$ ,  $K_{\bar{a}}$ ,  $K_e$ ,  $K_c$  – коефіцієнти комплексних ТЕП, відповідно: організаційно-технічний, виробничий, якості процесів ІПВ, екологічний та соціальний, які розраховуються для кожного процесу життєвого циклу ІПВ;  $\gamma_1 \dots \gamma_6$  – показники вагомості відповідних комплексних ТЕП.

Алгоритм прийняття рішень в запропонованій ІС ІПВ показаний на рисунку 3. В основі цього алгоритму лежить процес прийняття рішень в ІС ІПВ, який забезпечує виконання двох найбільш розповсюджених умов: виконання діяльності з мінімальними витратами (найбільш розповсюджена умова) та мінімізація часу виконання встановлених в ІС ІПВ задач. Тому в для прийняття рішень вибору раціональної стратегії по забезпеченню ТО передбачене виконання двох взаємовиключних блоків (блоки 3 і 4). При виконанні блоку 3 (перша умова) цільовою

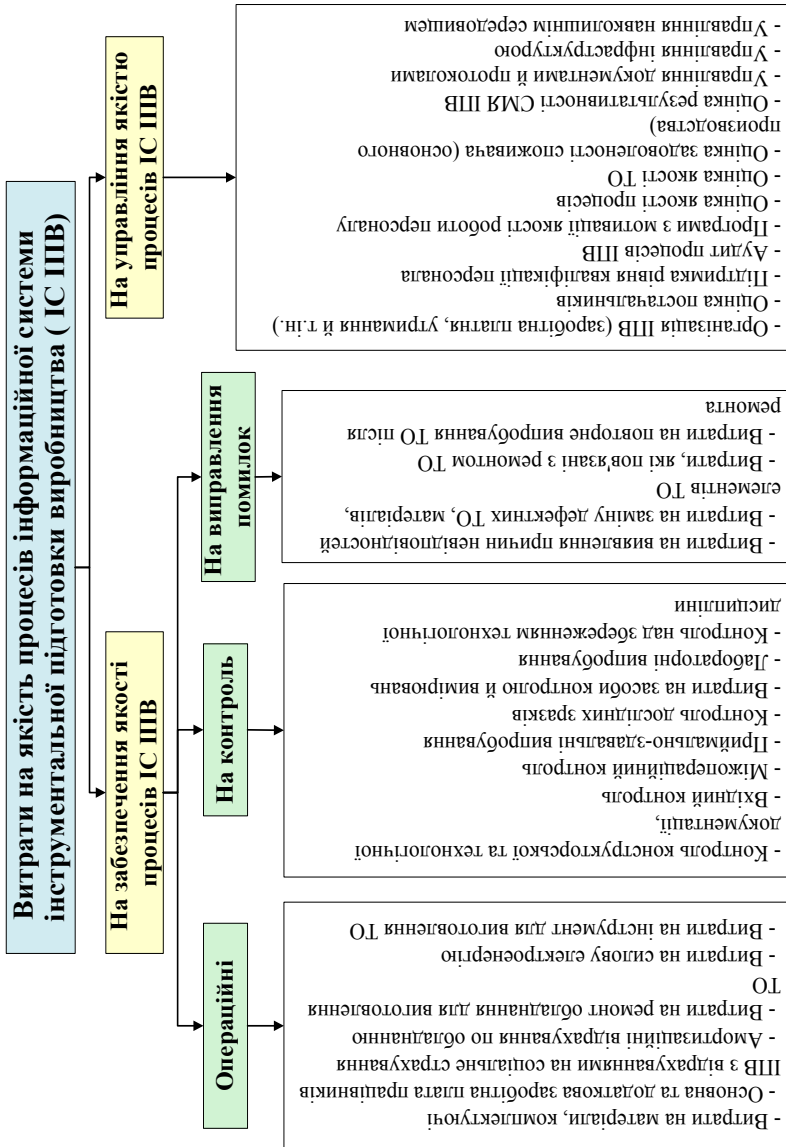


Рис. 2. Класифікація витрат на якість процесів ПІВ

функцією виступає коефіцієнт сталого розвитку ІС ІПВ, а час – одна із обмежуючих умов. При виконанні блоку 4 (друга умова) цільовою функцією є мінімізація часу при одній із обмежуючих умов – коефіцієнт сталого розвитку ІС ІПВ. Задача прийняття раціональних рішень зводиться до застосування методу оптимізації на графі – знаходження найкоротшого шляху. Основним при вирішенні задачі знаходження найкоротшого шляху є алгоритм Дейкстри, який вважається одним з найбільш ефективних алгоритмів при вирішенні завдання знаходження на графі найкоротшого шляху між двома виділеними вершинами.

Блок 5 (рис. 3) передбачає обчислення ймовірності реалізації обраної стратегії з допомогою застосування теорії марківських ланцюгів. Якщо значення розрахованої ймовірності менше рівня, який задовольняє особу, що приймає рішення, в такому разі необхідно розглянути альтернативні стратегії перебігу процесів ІС ІПВ.

У блоці 6 на основі отриманої з блоків 3, 4 та 5 інформації, особа, що приймає рішення, обирає рекомендовану стратегію розвитку процесів ІС ІПВ.

Необхідно відмітити, що з метою підвищення ТЕП ІС ІПВ при застосуванні запропонованої моделі передбачено визначення раціональної стратегії при підстановці ТЕП ІС ІПВ із підвищеними значеннями.

У зв'язку з можливою неузгодженістю між різними ТЕП (різні критерії, різні розмірності тощо) у запропонованій класифікації для визначення коефіцієнту сталого розвитку запропоновано проводити їх нормалізацію, тобто переводити в безрозмірні величини – бали (табл. 1) у відповідності зі значенням лінгвістичної змінної ТЕП (рис. 4).

Таблиця 1

**Шкала оцінювання ТЕП процесів ІС ІПВ**

Значення ТЕП	Значення лінгвістичної змінної «ТЕП»	Бал
1	2	3
$0 \leq u \leq 0,2$	Дуже добре	1
$0,2 < u \leq 0,34$	Добре	2
$0,34 < u \leq 0,66$	Задовільно	3
$0,66 < u \leq 0,8$	Погано	4
$0,8 < u \leq 1$	Дуже погано	5

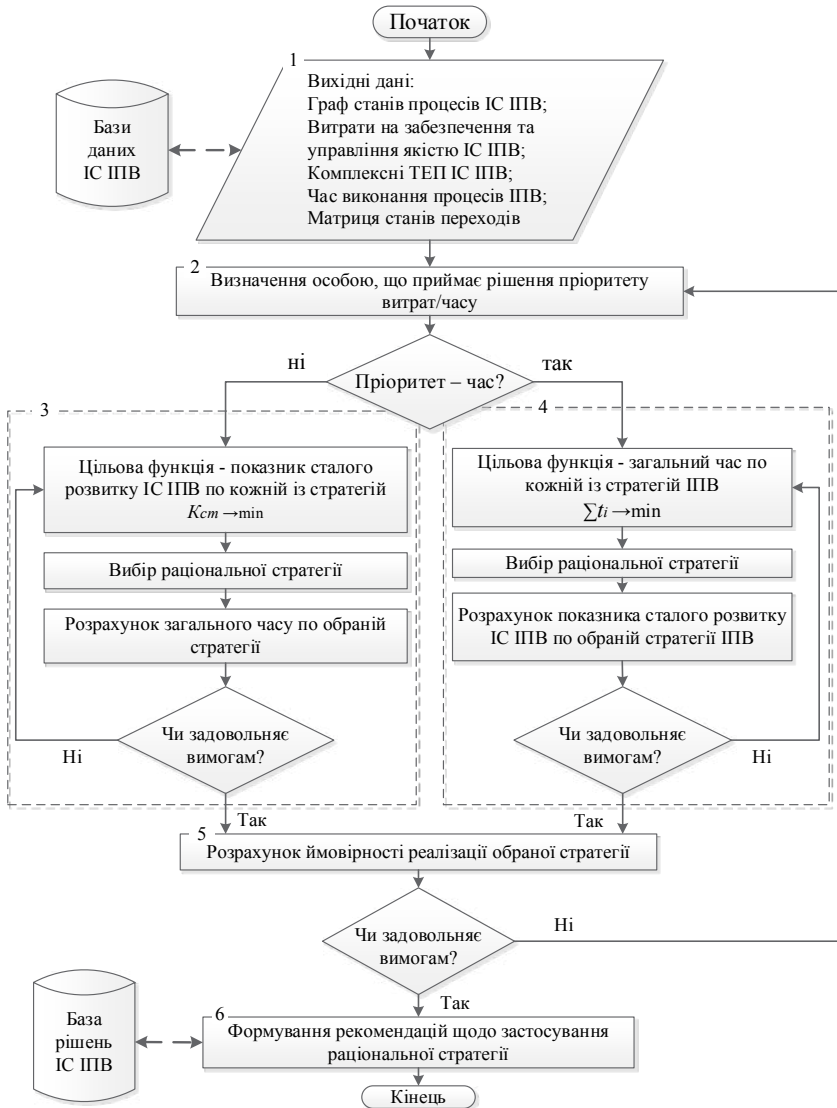


Рис. 3. Блок-схема реалізації математичної моделі щодо прийняття рішень в ІС ІПВ

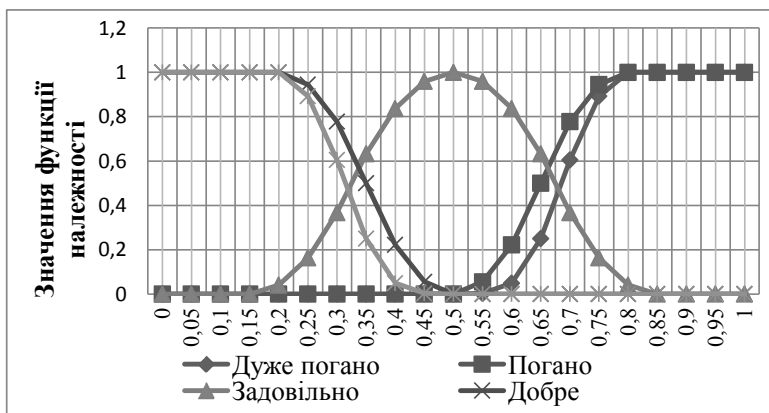


Рис. 4. Графічне зображення лінгвістичної змінної «ТЕП»

#### 4. Аналіз основних етапів алгоритму прийняття рішень в ІС ІПВ

Єдину шкалу нормалізації ТЕП системи ІПВ запропоновано розробляти на основі застосування теорії нечітких множин. Методика застосування математичного апарату теорії нечітких множин включає такі основні етапи: виділення параметрів, які характеризують досліджувану систему; визначення і формалізація лінгвістичних оцінок параметрів (фазифікація); побудова нечіткої бази знань про взаємозв'язки між параметрами; реалізація нечіткого логічного висновку про вплив вхідних параметрів на вихідні фактори; перетворення нечіткого логічного рішення в чітке значення (дефазифікація).

За основу взята шкала Харрінгтона, яка при прийнятті багатьох рішень дозволяє оцінювати будь-який показник за його наступними рівнями: дуже добре – 1; добре – 2; задовільно – 3; погано – 4; дуже погано – 5. Побудова функцій належності за зазначеними рівнями дає можливість графічно зобразити лінгвістичну змінну «ТЕП», як показано на рис. 4 та побудувати нормалізовану шкалу оцінювання ТЕП щодо кожного процесу життєвого циклу ІС ІПВ

Алгоритм прийняття рішень в ІС ІПВ складається з наступних основних етапів.

1. Визначення вихідних даних. Вихідні дані формуються в єдиній базі даних інформаційної системи підприємства.

Вихідними даними для прийняття раціонального рішення щодо процесів ІС ІПВ є прогнозовані значення витрат на забезпечення та управління якістю ІС ІПВ (на основі застосування раціональних методів прогнозування (рис.3) та комплексних техніко-економічних показників ІС ІПВ (виражених в балах), прогнозний час виконання процесів ІС ІПВ, а також матриця переходів станів процесів ІС ІПВ.

## 2. Побудова моделі станів процесів ІС ІПВ.

Модель управління ІС ІПВ, представляється у вигляді орієнтованого графу  $G(S, t)$ , де  $S$  – впорядковані пари вершин, а  $t$  – це дуги, що їх з'єднують [22, с. 11].

Граф станів процесів ІС ІПВ представлений на рис. 5.

3. Визначення пріоритету «стійкість ІС ІПВ/час» особою, що приймає рішення.

Прийняття рішень засновується на виконанні двох умов:

а) виконання діяльності з мінімальними витратами (найбільш розповсюджена умова);

б) мінімізація часу виконання встановлених задач в ІС ІПВ.

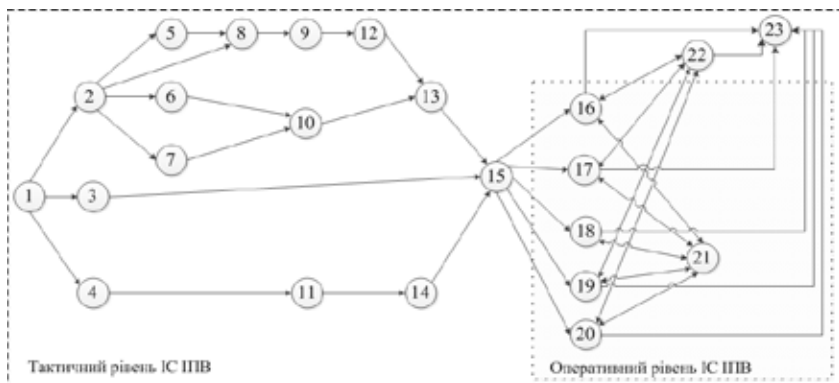
Для прийняття рішень вибору раціональної стратегії по забезпеченню ТО передбачене виконання двох взаємно виключних блоків (рис. 3) – блок 3 для умови а) і блок 4 для умови б).

Прийняття раціонального рішення проводиться методом оптимізації на графі з застосуванням алгоритму Дейкстри.

Блок 3 реалізує стратегію виконання діяльності з мінімальними витратами при забезпеченні необхідного рівня ТЕП ІС ІПВ, тобто реалізує стратегію забезпечення сталого розвитку ІПВ. Для виконання блоку 3 цільова функція оптимізації – функція визначення коефіцієнта сталого розвитку ІС ІПВ, який визначається за формулою цільової функції (1), в якій коефіцієнти  $K_o, K_e, K_s, K_e, K_c$  розраховуються для кожного процесу життєвого циклу ІПВ за формулою:

$$K = \sum_{i=1}^n (k_i)^{\frac{1}{n}},$$

Блок 3 реалізує стратегію виконання діяльності з мінімальними витратами при забезпеченні необхідного рівня ТЕП ІС ІПВ, тобто реалізує стратегію забезпечення сталого розвитку ІПВ. Для виконання блоку 3 цільова функція оптимізації – функція визначення коефіцієнта



- 1 – виявлення потреб в ТО, її уніфікації та нормативному забезпеченні;  
 2 – прийняття рішення про виготовлення, модернізацію ТО чи використання збірного ТО; 3 – прийняття рішення про використання ТО, що є в наявності;  
 4 – прийняття рішення про закупівлю уніфікованого ТО; 5 – розроблення проекту на виготовлення ТО; 6 – розроблення проекту на модернізацію ТО;  
 7 – розроблення проекту на складання ТО; 8 – підготовка плану випуску ТО;  
 9 – закупівля матеріалів; 10 – закупівля комплектуючих; 11 – закупівля ТО;  
 12 – виготовлення ТО; 13 – приймально-здавальні випробування ТО;  
 14 – приймальні випробування ТО; 15 – зберігання ТО; 16 – прокат виготовленого ТО; 17 – прокат модернізованого ТО; 18 – прокат збірного ТО;  
 19 – прокат ТО, що є в наявності; 20 – прокат придбаного ТО;  
 21 – централізоване заточування інструменту; 22 – ремонт ТО; 23 – утилізація ТО.

**Рис. 5. Граф станів процесів ІС ІПВ**

сталого розвитку ІС ІПВ, який визначається за формулою цільової функції (1), в якій коефіцієнти  $K_o$ ,  $K_e$ ,  $K_j$ ,  $K_e$ ,  $K_c$  розраховуються для кожного процесу життєвого циклу ІПВ за формулою:

Витрати на процес життєвого циклу ТО приймаються на одиницю ТО, тобто планові витрати на якість процесів ІС ІПВ розраховуються за формулою:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^m (B_{zi} + B_{yi})}{K_{TO}}, \quad (2)$$

де  $B_{zi}$  – плановані витрати на забезпечення якості процесу ІПВ;  
 $B_{yi}$  – плановані витрати на управління якістю процесу ІПВ;  
 $m$  – кількість статей калькуляції витрат на якість процесу ІПВ;  
 $K_{TO}$  – кількість ТО, щодо процесу ЖЦ якого приймається рішення.



**Примітка 4.** На тактичному рівні ІС ІПВ кожен процес спонукає витрати, які несуть негативну цінність, а на оперативному рівні, навпаки. Тому для оперативного рівня ІПВ пропонується відносити витрати на якість процесів ІПВ до кількості ремонтів чи переточувань.

Хоча процес переточування інструменту чи ремонту ТО і несе за собою витрати на якість, збільшення кількості переточувань збільшує цінність інструменту (збільшується строк окупності витрат, які закладені в виготовлення чи придбання ТО).

Таблиця 2

**Система ТЕП на тактичному рівні**

ТЕП за видами діяльності	ТЕП за результатуючим оптимальним значенням		
	Які прямують до 1	Які мають оптимальне абсолютне значення	Визначаються згідно логічних суджень експертів
Організаційно-економічні	<ul style="list-style-type: none"> <li>– капіталовіддача;</li> <li>– матеріаловіддача;</li> <li>– показник використання робочого часу виробничих робітників.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– капіталомісткість;</li> <li>– матеріаломісткість;</li> <li>– обсяг виготовленої ТО;</li> <li>– енергомісткість ТО;</li> <li>– собівартість ТО;</li> <li>– середньомісячна заробітна плата робітників ІС ІПВ;</li> <li>– продуктивність праці.</li> </ul>	–
Виробничі	<ul style="list-style-type: none"> <li>– використання обладнання;</li> <li>– використання виробничих площ;</li> <li>– диференціації ІВ;</li> <li>– безперервності ІВ;</li> <li>– повторюваності ІВ;</li> <li>– паралельності ІВ;</li> <li>– прямоточності ІВ;</li> <li>– універсальності ІВ;</li> <li>– гнучкості ІВ;</li> <li>– автоматизації ІВ;</li> <li>– рівень дефективності ТО.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– прогресивності структури обладнання;</li> <li>– використання площ складу ІРК;</li> <li>– спеціалізації ІВ;</li> <li>– пропорційності ІВ;</li> <li>– механізації інструментального виробництва;</li> <li>– коефіцієнт використання виробничої потужності;</li> <li>– коефіцієнт дублювання функцій.</li> </ul>	–

Закінчення таблиці 1

Якості	<ul style="list-style-type: none"> <li>– витрати на якість процесів ІС ІПВ;</li> <li>– коефіцієнт стандартизації ІПВ;</li> <li>– показник уніфікації ІВ;</li> <li>– показник прогресивності ТП ІВ;</li> <li>– технологічний коефіцієнт точності ТП</li> <li>– рівень стандартизації ТО.</li> <li>– рівень нормативного забезпечення.</li> </ul>	–	<ul style="list-style-type: none"> <li>– показник якості технічної документації по ІС ІПВ;</li> <li>– рівень якості ТО.</li> </ul>
Соціальні	<ul style="list-style-type: none"> <li>– показник зайнятості персоналу;</li> <li>– показник рівня атестації персоналу, що працює з підвищеною небезпечністю.</li> <li>– рівень потенційної небезпечності технологічних процесів ТО для навколишнього середовища;</li> </ul>	– показник функціонального розподілу праці ІТР та службовців системи ІПВ.	<ul style="list-style-type: none"> <li>– рівень інструктажу персоналу;</li> <li>– рівень нормативної документації в сфері охорони праці;</li> <li>– показник наявності використання засобів індивідуального захисту;</li> <li>– рівень потенційної небезпечності;</li> <li>– рівень планування і контролю заходів.</li> </ul>
Екологічні	<ul style="list-style-type: none"> <li>– частка скорочення обсягів викидів від загального обсягу;</li> <li>– зменшення щільності викидів в атмосферне повітря по відношенню до певної території;</li> <li>– рівень відповідності НД вимогам стандартів навколишнього середовища.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– питомий показник утворення відходів;</li> <li>– зменшення кількості днів, у які забруднення атмосферного повітря перевищувало ГДК.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– рівень змісту та оформлення доказової документації екологічної безпеки процесів;</li> <li>– рівень виконання вимог до захисту навколишнього середовища (по кожному процесу).</li> </ul>

Обмежуючими умовами при виконанні блоку 4 виступають:

$$K_{\text{ст}} \rightarrow \min \text{ та } \sum_{k=1}^6 \gamma_k = 1$$

Блок 5 передбачає обчислення ймовірності реалізації обраної стратегії з допомогою застосування теорії марківських ланцюгів. Значення ймовірності реалізації обраної стратегії перевіряють на виконання умови перевищення необхідного рівня ймовірності:

$$\sum_{j=1}^n p_j \geq 0,4$$

Якщо значення розрахованої ймовірності менше достатнього рівня, вважають, що ймовірність перебігу процесів є наднизькою. В такому разі необхідно розглянути альтернативні стратегії перебігу процесів ІС ППВ, поки не буде позитивно виконана умова.

### **5. Методика практичної реалізації запропонованої моделі**

У процесі розробки методики практичної реалізації запропонованої моделі визначено критерії вибору методу прогнозування, який найбільш адекватно враховує специфіку конкретного процесу ППВ. На основі визначених критеріїв з використанням експертного методу попарного порівняння розроблено інструментарій з вибору раціонального методу прогнозування ТЕП та витрат на процеси ІС ППВ. Запропонований метод дозволяє значно скоротити час на розробку прогнозуючої моделі щодо оцінювання якості перебігу процесів ІС ППВ та її результативності в цілому. Це дозволяє в повній мірі підвищити гнучкість ІС ППВ вітчизняних промислових підприємств у швидкозмінних умовах.

Рішення в системі ППВ, приймаються на основі інформації, яка є продуктом ІС ППВ, тобто первинна інформація перетворюється на результатну, придатну для прийняття рішень. В ІС ППВ частина процедур формального перетворення первинної інформації в результатну автоматично виконується технічними засобами за заздалегідь заданими алгоритмами, без безпосереднього втручання людини. ІС ППВ може повністю функціонувати в автоматичному режимі, але персонал ІС ППВ визначає склад і структуру первинної та результатної інформації, порядок збору та реєстрації первинної інформації, контролює її повноту і достовірність, визначає порядок виконання перетворень первинної інформації в результатну, контролює хід виконання процесу перетворень.

Враховуючи вищезазначене, розглянутий в роботі алгоритм прийняття раціонального рішення в ІС ІПВ був реалізований на прикладі процесів тактичного рівня ІС ІПВ за допомогою засобів MS EXEL (застосовуються для автоматизації процесу збору первинної інформації щодо ТЕП ІС ІПВ), а також розробленого програмного забезпечення «Пошук найкоротшого шляху», що дозволяє за описаним у другому розділі алгоритмом Дейкстри отримати результатну інформацію для прийняття рішень. На основі отриманої інформації приймається відповідне раціональне рішення в ІС ІПВ. Підтвердженням вибору раціональної стратегії виступає розрахунок ймовірності її виконання за допомогою застосування марківських ланцюгів.

Результати впровадження запропонованої Методики прийняття рішень в ІС ІПВ запропоновано оцінювати за допомогою порівняльної економічної ефективності: відношення собівартостей продукції при виконанні базової  $C_6$  та прийнятої  $C_{np}$  стратегії інструментозабезпечення:

$$E = \frac{C_6}{C_{np}}.$$

Наприклад, для розрахунку  $E$  впровадження Методики прийняття рішень в ІС ІПВ на підприємстві ПАТ «СМНВО» були взяті дані для п'яти технологічних процесів виготовлення деталей за 2013-2014 рр.: номенклатура інструменту для їх виготовлення, кошторис собівартості деталі. Розрахунок наведений у [23], де доведено, що в середньому ефективність впровадження методики прийняття рішень в ІС ІПВ становить 13%.

## **6. Розроблення рекомендацій щодо впровадження та нормативного забезпечення ІС ІПВ**

Процес впровадження розробленого нормативно-методичного забезпечення ІС ІПВ та запропонованих рекомендацій по впровадженню розробленої моделі у виробництво на вітчизняних машинобудівних підприємствах дуже часто ускладнюється достатньо складною системою забезпечення співпраці різних структурних підрозділів та осіб, які відповідають за окремі види діяльності, особливо в умовах недостатньої забезпеченості виробництва необхідним для практичного використання сучасних інформаційних технологій оснащенням. Тому для мінімізації

ризиків, пов'язаних з реалізацією моделі ІС ІПВ, запропонований алгоритм її розроблення та впровадження, показаний на рис. 6.

Також розділ містить матеріали з розробки проектів нормативних документів для кожного з етапів ЖЦ: проектування, розробки та виготовлення інструменту і оснащення, а також практичної реалізації розробленої в розділі 2 моделі прийняття рішень в ІС ІПВ.

На основі отриманих результатів теоретичних і практичних досліджень розроблено структури проекти двох стандартів організації України (COU): «Система управління якістю інструментальної підготовки виробництва в інформаційній системі підприємства» (поширюється



Рис. 6. Алгоритм впровадження системи ІС ІПВ

на інформаційні системи ПАТ, використовувані в процесах життєвого циклу інструментальної підготовки виробництва та встановлює стадії і етапи проектування та розроблення ТО, виготовлення ТО, а також зміст робіт на кожному етапі) та «Експлуатація технологічного оснащення в умовах функціонування інформаційних систем» (стандарт поширюється на процес експлуатації технологічного оснащення та на застосування інтерактивних електронних технічних керівництв).

## 7. Висновки

В дослідженні вирішена актуальна науково-прикладна задача вдосконалення нормативного забезпечення процесів управління й оцінки якості ППВ в умовах функціонування інформаційних технологій, вирішення якої забезпечить підвищення ефективності виробництва, включаючи підвищення надійності, зниження витрат і скорочення часу на інструментальне забезпечення і, відповідно, випуск продукції. На основі проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

1. На основі аналізу сучасних тенденцій в області інформаційних технологій розроблено модель управління якістю інструментальної підготовки виробництва машинобудівного підприємства в умовах функціонування інформаційних технологій, яка дозволяє простежувати інформаційні зв'язки ППВ. Доведено можливість застосування запропонованої моделі на будь-якому машинобудівному підприємстві.

2. Запропоновано критерії вибору раціональних методів прогнозування витрат на процеси ППВ. На основі запропонованих критеріїв був розроблений інструментарій, який дозволяє врахувати специфіку конкретного процесу ППВ при виборі методів прогнозування будь-яких показників на кожному етапі життєвого циклу технічного оснащення.

3. Запропоновано принципи класифікації витрат на якість процесів ППВ машинобудівних підприємств. Це дозволило сформулювати універсальну класифікацію витрат на якість ППВ на будь-якому машинобудівному підприємстві.

4. Запропоновано систему ТЕП ІС ППВ, які враховують специфіку протікання її процесів. ТЕП ІС ППВ доцільно класифікувати за видами діяльності: організаційно-економічні; виробничі; управління якістю; екологічні; соціальні. Запропонована система ТЕП ІС ППВ може бути використана для раціоналізації діяльності з ППВ різних машинобудівних підприємств.

5. Запропоновано оцінювання ТЕП на основі застосування теорії нечітких множин. Цей метод дозволяє узгодити ТЕП трьох видів: ТЕП, що прямують до одиниці; ТЕП, які мають оптимальне абсолютне значення та ТЕП, що визначаються згідно логічних суджень експертів.

6. Запропоновано принципи формування інструментарію управління якістю ІПВ. На їх основі розроблена математична модель управління техніко-економічними показниками з врахуванням витрат на якість ІПВ, яка дозволить спрогнозувати найбільш ймовірний сценарій протікання процесів ІПВ, оперативно приймати управлінські рішення, тим самим мінімізувати витрати на ІПВ. При виборі раціонального рішення вперше запропоновано застосовувати коефіцієнт сталого розвитку ІС ІПВ. Доведена універсальність запропонованої моделі, застосовність не залежно від специфіки підприємства.

7. Доведено універсальність принципів формування нормативного забезпечення системи управління якістю ІПВ методами прогнозування в умовах інформаційних технологій.

8. На основі отриманих результатів досліджень розроблено структури проекти двох стандартів організації України (COU): «Система управління якістю інструментальної підготовки виробництва в інформаційній системі підприємства» та «Експлуатація технологічного оснащення в умовах функціонування інформаційних систем»

### Список літератури:

1. Зеленцова Е.В., Зеленцова Н.Ф. Системный подход к инструментальному обеспечению предприятия. URL: [http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal\\_24Theme1.shtml](http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal_24Theme1.shtml)
2. Губич Л., Иванец Г., Поздняков В. Компьютеризация инструментального производства – приоритетная задача промышленности. *САИП и графика*. 2001. № 2. С. 23–25.
3. Ивченко А.В. Управление качеством инструментальной подготовки производства многономенклатурного машиностроительного предприятия : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.01.02 «Стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение». КНУТД, 2009. 278 с.
4. Ивченко А.В., Залога В.А. Оптимизация организационной структуры инструментальной подготовки производства. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2008. Вип. 2. С. 238–248.
5. Костюк И.В. Интеллектуальная поддержка автоматизированной системы управления инструментом на машиностроительном

предприятия : диссертация ... кандидата технических наук : спец. 05.13.06. Набережные Челны: Кам. гос. инж. экон. акад, 2009. 164 с.: ил.

6. Dynnyk O., Denysenko Y., Zaloga V., Ivchenko O., Yashyna T. Information Support for the Quality Management System Assessment of Engineering Enterprises. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. Pages 65–74. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_7)

7. Левин А.И., Судов Е.В. Концепция и технологии компьютерного сопровождения процессов жизненного цикла продукции *Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обеспечение индустриального бизнеса*. 2001. С. 612–625.

8. Вайсман В.О. Моделі, методи та механізми створення і функціонування проектно-керованої організації : монографія. Київ : Науковий світ, 2009. 146 с.

9. Окулесский В.А. Функциональное моделирование – методологическая основа реализации процессного подхода. Москва : НИЦ CALS-технологий «Прикладная логистика», 2001. 56 с.

10. Чорна Н.О. Оцінка можливості застосування CALS-технологій до розв'язання задач розподіленого управління. *Управління розвитком складних систем* : Збірник наукових праць. 2011. № 8. С. 97–100.

11. CALS. URL: <http://uk.wikipedia.org/wiki/CALS>

12. Левин А.И., Судов Е.В. CALS-сопровождение жизненного цикла. *Открытые системы*. 2001. № 3. С 58–62.

13. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. Москва : Мир, 1974. 406 с.

14. Антохонова И.В. Методы прогнозирования социально-экономических процессов : учебное пособие. Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2004. 212 с.

15. Ханк Д.Э., Райтс А.Дж., Уичерн Д.У. Бизнес-прогнозирование. Москва : Издательский дом Вильямс, 2003. 656 с.

16. Азгальдов Г. Г., Гличев А.В., Панов В.П. Что такое качество? Москва : Экономика, 1968. 135 с.

17. Crosby Ph.B. Quality brings Gewink. Hamburg, 1986.

18. Торопцева А.Н., Герасимов Б.И. Экономический анализ системы менеджмента экологического качества промышленного предприятия: монография. Тамбов : Изд-во ТГТУ, 2006. 148 с.

19. Feigenbaum A.V. Quality and Productivity. *Quality Progress*. 1977. Nov, pp. 18–21.

20. Залесов В.А. Совершенствование системы технико-экономических показателей для управления деятельностью подразделений по машинной обработке информации промышленных предприятий : дис. ... к.э.н. : спец. 05.13.10. Ленинград, 1984. 183 с.

21. Залога В.О., Денисенко Ю.О., Івченко О.В. Система техніко-економічних показників інструментальної підготовки виробництва. *Резание и инструмент в технологических системах* : Междунар. науч.-техн. сб. Харьков : НТУ «ХПИ», 2015. № 85. С. 79–89.

22. Оре О. Теория графов / под ред. И.М. Овчинниковой. Издательство наука, 1980. 336 с.



23. Денисенко Ю.О., Залого В.О., Івченко О.В., Обґрунтування ефективності впровадження методики прийняття рішень в інформаційній системі управління якістю інструментозабезпечення. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. 2015. № 1(72). С. 31–36.

### References:

1. Zelentsova E.V., Zelentsova N.F. (2004). Sistemnyy podkhod k instrumental'nomu obespecheniyu predpriyatiya [A systematic approach to enterprise tooling]. *Prommashinstrument*, vol. 24. Retrieved from: [http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal\\_24Theme1.shtml](http://www.instrument.spb.ru/zurnals/24/zurnal_24Theme1.shtml) (accessed 10 October 2019). (in Russian)
2. Gubich L., Ivsnets G., Pozdnyakov V. (2001). Kompyuterizatsiya instrumentalnogo proizvodstva – prioritetnaya zadacha promyshlennosti [Computerization of tool production is a priority for industry]. *CAD and graphics*, vol. 2, pp. 23–25. (in Russian)
3. Ivchenko A.V. (2009). Upravlenie kachestvom instrumentalnoy podgotovki proizvodstva mnogonomenklaturnogo mashinostroitel'nogo predpriyatiya [Quality management of tool preparation for the production of a multinomenclature engineering enterprise]. (PhD Thesis). Kyiv: Kyiv National University of Technology and Design. (in Russian)
4. Ivchenko A.V. (2008). Optimizatsiya organizatsionnoy struktury instrumentalnoy podgotovki proizvodstva [Optimization of the organizational structure of instrumental preparation of production]. *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni* [Modern technologies in mechanical engineering]. Kharkiv: NTU «KhPI», pp. 238–248.
5. Kostyuk I.V. (2009). Intellektualnaya podderzhka avtomatizirovannoy sistemy upravleniya instrumentoobespecheniem na mashinostroitel'nom predpriyatii [Intellectual support of an automated tool management system at a machine-building enterprise]. (PhD Thesis). Naberezhnye Chelny: Kama State Academy of Engineering and Economics. (in Russian)
6. Dynnyk O., Denysenko Y., Zaloga V., Ivchenko O., Yashyna T. (2020). Information Support for the Quality Management System Assessment of Engineering Enterprises. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 65–74. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_7)
7. Levin A.I., Sudov E.V. (2001). Kontseptsiya i tekhnologii kompyuternogo soprovozhdeniya protsessov zhiznennogo tsikla produktsii [The concept and technology of computer support of product life cycle processes]. *Informatsionnye tekhnologii v naukoemkom mashinostroenii. Kompyuternoe obespechenie industrial'nogo biznesa* [Information technology in high technology engineering. Computer software for industrial business]. Kyiv: Tekhnika, pp. 612–625. (in Russian)
8. Vaisman V.O. (2009). Modeli, metody ta mekhanizmy stvorennia i funktsionuvannia proektno-kerovanoi orhanizatsii [Models, methods and mechanisms of creation and functioning of a project-managed organization]. (Monografy). Kyiv: Naukovy svit. (in Ukrainian)
9. Okulesky V.A. (2001). Funktsionalnoe modelirovanie – metodologicheskaya osnova realizatsii protsessnogo podkhoda [Functional modeling is the

methodological basis of the process approach implementation]. Moscow: CALS Technology Research Center "Applied Logistics". (in Russian)

10. Chorna N.A. (2011). Otsinka mozhylyvosti zastosuvannya CALS-tekhnologiy do rozvyazannya zadach rozpodilenoho upravlinnya [Estimation of possibility of application of CALS-technologies to the solution of the problems of distributed management]. *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system* [Management of complex systems development], vol. 8, pp. 97–100. (in Ukrainian)

11. CALS. Retrieved from: <http://uk.wikipedia.org/wiki/CALS> (accessed 20 May 2016).

12. Levin A.I., Sudov E.V. (2001). CALS-soprovozhdenie zhiznennogo tsikla [CALS life cycle support]. *Otkrytye sistemy* [Open systems], vol. 3, pp. 58–62.

13. Boks Dzh. (1974). Analiz vremennykh ryadov, prognoz i upravlenie [Time Series Analysis, Forecast and Management]. Moscow: Peace. (in Russian)

14. Antokhonova I.V. (2004). Metody prognozirovaniya sotsialno-ekonomicheskikh protsessov [Methods for predicting socio-economic processes]. Ulan-Ude: Publishing House of VSTU. (in Russian)

15. Khank D.E., Rayts A.Dzh., Uichern D.U. (2003). Biznes-prognozirovanie [Business forecasting]. Moscow: Publishing House Williams. (in Russian)

16. Azgaldov G.G., Glichev A.V., Panov V.P. (1968). Chto takoe kachestvo? [What is quality?]. Moscow: Economy. (in Russian)

17. Crosby Ph.B. (1986). Quality bringt Gewink. Hamburg.

18. Toroptseva A.N., Gerasimov B.I. (2006). Ekonomicheskii analiz sistemy menedzhmenta ekologicheskogo kachestva promyshlennogo predpriyatiya [Economic analysis of the environmental management system of an industrial enterprise] (Monografiya). Tambov: Publishing House of TSU. (in Russian)

19. Feigenbaum A.V. (1977). Quality and Productivity. *Quality Progress*, pp. 18–21.

20. Zalesov V.A. (1984). Sovershenstvovanie sistemy tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley dlya upravleniya deyatelnostyu podrazdeleniy po mashinnoy obrabotke informatsii promyshlennykh predpriyatiy [Improving the system of technical and economic indicators for managing the activities of units for machine processing information of industrial enterprises] (PhD Thesis). Leningrad. (in Russian)

21. Zaloga V., Denysenko Y., Ivchenko O. (2015). Sistema tekhniko-ekonomichnykh pokaznykiv instrumentalnoyi pidhotovky vyrobnytstva [System of technical and economic indicators of tool preparation]. *Rezanye y ynsrument v tekhnolohycheskykh systemakh* [Cutting and tooling in technological systems]. Kharkiv: NTU «KhPI», vol. 85, pp. 79–89. (in Ukrainian)

22. Ore O. (1980). Teoriya grafov [Graph theory]. Moscow: Publishing House "Science". (in Russian)

23. Denysenko Y., Zaloga V., Ivchenko O. (2015). Obgruntuvannya efektyvnosti vprovadzhennya metodyky pryynyattya rishen v informatsiyniy systemi upravlinnya yakystyu instrumentozabezpechennya [Substantiation of effectiveness of implementation of decision-making methodology in the information system of quality management of the tool preparation]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Zhytomyr State Technological University]. Zhytomyr: ZhSTU, vol. 1(72), pp. 31–36. (in Ukrainian)

**DEVELOPMENT OF AN ENVIRONMENTALLY FRIENDLY  
SCHEME FOR THE RECOVERY OF USED ENGINE OILS**

**РОЗРОБКА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОЇ СХЕМИ  
ВІДНОВЛЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ МОТОРНИХ ОЛИВ**

**Yuliia Zelenko<sup>1</sup>**

**Maryna Bezovska<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-55>

**Abstract.** Waste generation is a significant problem for Ukraine's rail transport. The simplest methods used today for the recovery of waste oils on the railways do not give a full effect; therefore, it is more rational to use the latest developments that will quickly pay off and give a significant ecological and economic effect. We have developed and proposed a scheme for the recovery of waste oils. When developing the general scheme for restoring the operational quality of the used engine oils, we proceeded from the results of the performed laboratory tests on different purification methods and an optimized variant of the chosen technology. Considerable attention was also paid to the ecologo-toxicological side of this issue. After all, used petroleum products are toxic waste, which have a low biodegradation degree (10-30%). The toxicity of petroleum products is determined by the combination of hydrocarbons that are part of their composition. It should be noted that the main compounds that form the negative toxicological profile of oily waste (including waste oils) are benz(α)pyrene, furans, dioxins, polychlorinated biphenyls, and others. The main recommendation of the international community for the composition of oils from this point of view is the absence of heavy metals and chlorinated compounds in them. That is why we checked the fresh, used and recovered oils according to the proposed scheme for the content of benz(α)pyrene, heavy metals and chloride ions. After comparing the environmental indicators of fresh, discarded and

---

<sup>1</sup> Professor, Head of the Department of Chemistry and Environmental Engineering, Senior Researcher Laboratory "Ecology in rail transport", Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Ukraine  
<sup>2</sup> Associate Professor of the Department of Chemistry and Environmental Engineering, Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Ukraine

recovered oils we found that chloride ions are absent at all stages; also, when working with the oils of both brands there appears a benz(a)pyrene, which completely disappears from the oils after processing them according to the proposed schemes; a significant reduction in the amount of toxic elements after the treatment of oils according to the proposed schemes confirms the safety of recovered oils and the ecological compatibility of the schemes. Thus, the implementation of the proposed scheme will return valuable raw materials (oil) to the process cycle, will create almost non-waste production of recovered oils, as well as promote the creation of a non-waste production-territorial complex on the basis of the linear unit of the railway, which will give an opportunity to obtain significant economic effect.

### 1. Вступ

Одними з найактуальніших проблем сучасного розвитку науково-технічного прогресу є проблема охорони навколишнього середовища від забруднень, утворення відходів виробництва та споживання і раціонального використання природних ресурсів. Зокрема значною проблемою є утворення нафтовмісних відходів різних галузей промисловості. Так, для залізничного транспорту – це одне з найгостріших екологічних питань.

Відповідно до прийнятих рішень, відпрацьовані нафтопродукти підлягають обов'язковому збору та утилізуванню, а в окремих випадках і знищенню. Найбільш ефективним способом утилізування є регенерація – вторинна переробка відпрацьованих олив з метою повного відновлення їхніх первинних властивостей, яке здійснюється, як правило, шляхом складної багатостадійної переробки на спеціалізованих підприємствах. Постійна поява нових способів і засобів рішення завдань утилізування, створення все досконаліших, безвідхідних методів регенерації відпрацьованих мастильних матеріалів, питання екології та охорони здоров'я людини викликають необхідність постійної уваги до даної проблеми, що перебуває на стику техніки, екології та економіки.

Для більшості держав регенерація з отриманням кондиційних мастильних матеріалів є найкращою можливістю організувати в країні на власній сировинній базі виробництво цієї важливої для багатьох сфер народного господарства продукції. Крім того, регенерація

дозволяє ефективно позбутися від небезпечних відходів виробництва, уникнувши при цьому витрат на їхнє знищення, заощадити природні й трудові ресурси, капіталовкладення, матеріали й електроенергію, підвищити ступінь забезпеченості держави власними ресурсами за рахунок використання вторинних.

Метою нашого дослідження є як пошук можливостей зменшення навантаження на навколишнє природне середовище шляхом розробки новітніх схем поводження з нафтовміщуючими відходами, так і дослідження їх токсикологічного профілю на всіх етапах – від моменту утворення до перевірки безпеки після утилізування.

## **2. Токсичність нафтовміщуючих відходів**

Відпрацьовані нафтопродукти є токсичними відходами, які мають невисокий ступінь біорозкладання (10-30%). Токсичність нафтопродуктів визначається сполученням вуглеводнів, які входять до їх складу. Зокрема арени є найсильнішими канцерогенами у складі нафтопродуктів, також значну токсичну дію мають олефіни, сполуки сірки, азоту та кисню. Особливо негативну дію відпрацьовані нафтопродукти мають на центральну нервову та серцево-судинну системи людини, ендокринний апарат організму, знижують гематологічні показники, викликають ураження печінки та щитовидної залози [1, с. 188, 2, р. 1081–1082].

Велику шкоду відпрацьовані нафтопродукти спричиняють і навколишньому природному середовищу і особливо водним ресурсам. Так, за оцінками експертів один літр відпрацьованої оливи може забруднити близько семи мільйонів літрів ґрунтових вод. Вплив нафтовміщуючих відходів на довкілля і людину показаний на рисунку 1.

Нафтові оливи (мінеральні оливи) – це рідкі суміші алкілнафтоєвих і алкілароматичних вуглеводнів (температура кипіння 300-600°C), які одержують шляхом переробки нафти. які одержують шляхом переробки нафти. Відпрацьованою вважається нафтова олива, що відпрацювала свій термін або втратила у процесі експлуатації якість, встановлену нормативно-технічною документацією, і злита з робочої системи.

Хімічна композиція відпрацьованого мастильного матеріалу варіює у залежності від характеристик вихідної сировини, технології перегонки нафти, продуктивності і типу двигуна, у якому ці оливи

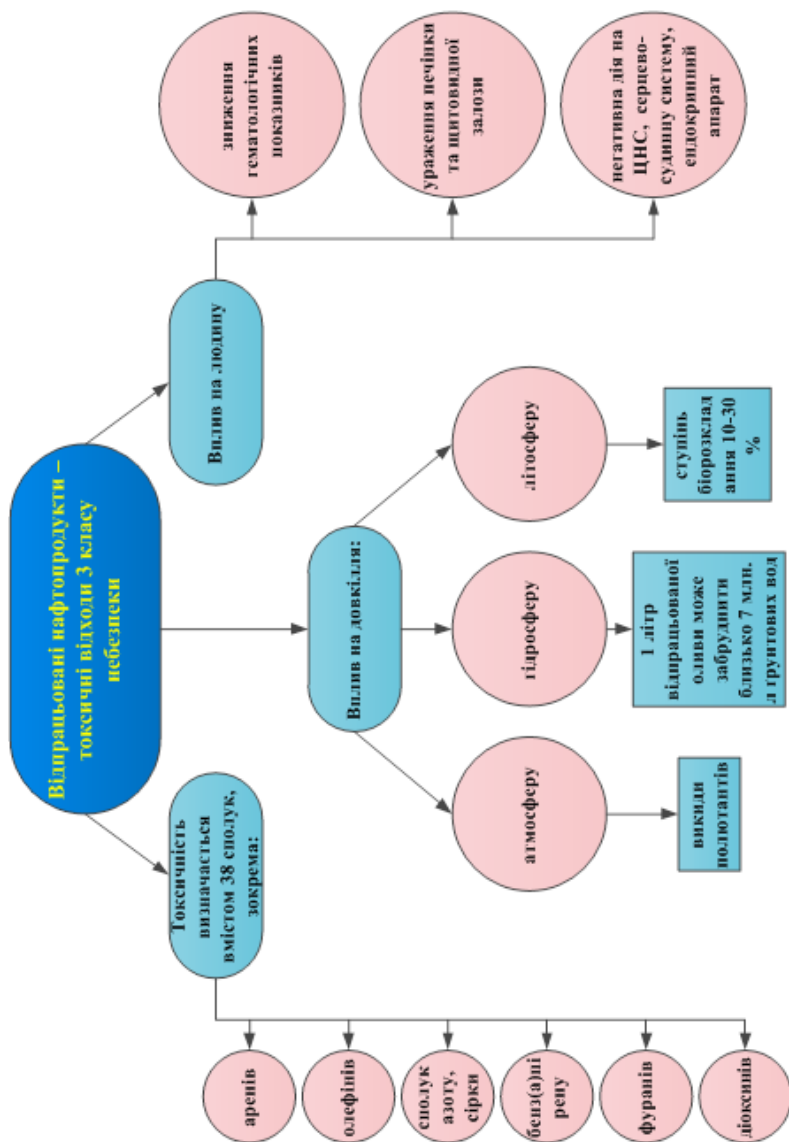


Рис. 1. Вплив відрізняваних нафтопродуктів на довкілля і людину

використовуються, складу присадок, тривалості часу, протягом якого оливи експлуатуються у двигуні. Відмічається, що найбільша концентрація важких металів, механічних домішок, забруднень спостерігається у моторних оливах, що накопичуються у відпрацьованих оливних фільтрах.

В одиниці маси відпрацьованого мастильного матеріалу міститься у середньому 73-80% аліфатичних вуглеводнів (головним чином – алканів (парафінів) і циклоалканів з 1-6 кільцями), 11-15% моноароматичних вуглеводнів, 2-5% діароматичних вуглеводнів, 4-8% поліароматичних вуглеводнів [1, с. 188].

Головним чином, токсичність відпрацьованих олив зростає через поступове збільшення вмісту бенз(α)пірену, і це у значній мірі визначає третій клас токсичності цих відходів. Вміст у відпрацьованих оливах бенз(α)пірену в більшості країн служить показником їхньої небезпеки, оскільки сумарна токсична дія бенз(α)пірену приблизно в 10000 разів вище, ніж в оксидів азоту, що також утворюються у працюючих оливах. Вміст бенз(α)пірену може збільшуватися до 15 мг/кг (загальний вміст поліциклічних аренів до 482 мг/кг), а частка від загальної канцерогенності відпрацьованої оливи становить 18%.

Речовини, що містяться у відпрацьованих оливах, здатні накопичуватися в ґрунті й атмосфері, можуть негативно впливати на імунну систему людини, функціонування внутрішніх органів, мають ембріоту генотоксичну дію, викликають дисбаланс статевих гормонів [1, с. 189, 3. с. 9].

Також варто зазначити, що до складу композицій мастильних олив з метою поліпшення їх функціональних властивостей вводяться компоненти, які характеризуються певними токсикологічними властивостями. До таких компонентів можна віднести функціональні присадки, що додаються до основ олив з метою поліпшення їх ефективності: протизношувальної, протизадирної (совол, трикрезилфосфат); захисної (бензотриазол); антиокисної (параоксидифеніламін, феніл-α-нафтиламин, іонол).

Саме тому відпрацьовані нафтопродукти і зокрема відпрацьовані оливи були віднесені світовим співтовариством до категорії небезпечних відходів.

### 3. Міжнародні домовленості

Відпрацьовані оливи містять у своєму складі за різними оцінками близько 38 хімічних сполук, що мають мутагенну та канцерогенну дію. Серед цих сполук, крім бенз(α)пірену, треба виділити фурані, діоксини, поліхлордіфеніли та інші. Останні дві сполуки включені Стокгольмською конвенцією у список дванадцяти найтоксичніших стійких органічних забруднювачів планети [3, с. 8–9].

Тому на своїй третій нараді конференція сторін Стокгольмської конвенції, яка пройшла з 30 квітня по 4 травня 2007 року в Дакарі (Сенегал), своїм рішенням прийняла оновлений проект керівних принципів по найкращим наявним методам (ННМ) і попереднім вказівкам по найкращим видах природоохоронної діяльності (НВПД).

Хімічні речовини, що були зазначені в Стокгольмській конвенції, включають: поліхлорований дібензо-п-діоксини (ПХДД), поліхлоровані дібензофурані (ПХДФ), поліхлоровані біфеніли (ПХБ) і гексахлорбензол (ГХБ). Ці речовини, крім того, що вони є речовинами з документованою токсичністю, є достатньо стійкими, здатні до біоакмуляції і перенесення на великі відстані. У керівних принципах і вказівках вказані процеси, які ведуть до ненавмисного утворення і викиду цих речовин, а також їх вплив на людину і навколишнє середовище. Крім того, перераховані ефективні заходи для запобігання викидам цих речовин. Так, серед інших до них віднесені:

- використання маловідхідної технології;
- використання менш небезпечних хімічних речовин;
- сприяння розповсюдженню практики рекуперації і рециркуляції відходів і речовин, які утворюються і використовуються в межах того або іншого процесу;
- заміна матеріалів в тих випадках, коли вони є стійкими органічними забруднювачами або коли є безпосередній зв'язок між матеріалами і викидами стійких органічних забруднювачів з джерела;
- раціональне господарювання і програми в області профілактичного ремонту;
- удосконалення методів регулювання відходів в цілях припинення відкритого або іншого неконтрольованого спалювання відходів, включаючи спалювання звалищ сміття. При розгляді пропозицій про будівництво нових установок по видаленню відходів увагу слід приді-



ляти таким альтернативам, як заходи щодо максимального скорочення утворення різних типів відходів, включаючи відновлення ресурсів, повторне використання, рециркуляцію, розділення відходів і сприяння використанню продуктів, які приводять до утворення меншого об'єму відходів. На основі цього підходу повинні ретельно розглядуватися питання охорони здоров'я людини;

- максимальне скорочення цих речовин, присутніх в продуктах у вигляді забруднювачів;

- необхідність уникати використання елементарного хлору або хімічних речовин, що включають елементарний хлор [3, с. 9–10].

Окрім Стокгольмської конвенції існує також ще одне глобальна угода, а саме Базельська конвенція щодо контролю за транскордонним перевезенням небезпечних відходів і їх видаленням, яка була прийнята в 1989 році і набрала чинності 1992 року. Базельська конвенція накладає на країни-учасниці зобов'язання, поміж інших, по мінімізації виробництва небезпечних відходів; забезпеченню адекватних установок по утилізуванню; а також забезпеченню екологічно безпечного управління відходами.

Конференція сторін Базельської конвенції на своєму восьмому засіданні в грудні 2006 року прийняла оновлений варіант загальних технічних вказівок по екологічно обґрунтованому управлінню відходами, що складаються із стійких органічних забруднювачів, а також оновлений варіант вказівок по екологічно обґрунтованому поводженню з відходами, що складаються з поліхлорованих біфенілів, поліхлорованих терфенілів або полібромованих біфенілів, відходами, що містять ці речовини, або відходами, забрудненими цими речовинами.

Підприємства по переробці відпрацьованих олив наводяться в Стокгольмській конвенції як потенційне джерело утворення і викидів хімічних речовин. Виявилося, що відпрацьовані оливи можуть бути забруднені поліхлорованим дібензо-п-діоксинами (ПХДД), поліхлорованими дібензофуранами (ПХДФ) і поліхлорованими біфенілами (ПХБ).

Зазначено, що в даний час немає свідоцтв того, що на підприємствах по переробці відпрацьованих олив відбувається новоутворення ПХДД/ПХДФ або ПХБ. Наявні дані свідчать, що викиди ПХДД/ПХДФ і ПХБ підприємствами по переробці відпрацьованих олив або підприємствами по їх транспортуванню і утилізуванню відбуваються

в результаті промислового, спеціального виробництва ПХБ або хлорбензолів, які потрапляють у відпрацьовані оливи як забруднювачі або в процесі синтезу (цих хімічних речовин), або в процесі використання або попередньої рециркуляції. У цьому сенсі підприємства по переробці відпрацьованих олив є не джерелом формування хімічних речовин, а швидше джерело їх розповсюдження.

Згідно наявної інформації, варіанти утилізування відпрацьованих олив включають: повторне використання або регенерацію, термічний крекінг, і спалювання або використання як паливо. Слід зазначити, що в багатьох країнах також практикується скидання на звалище і відкрите спалювання.

Так як на підприємствах по переробці відпрацьованих олив саме відпрацьовані оливи є основними джерелами забруднення ПХДД/ПХДФ і ПХБ, єдиною основною мірою по скороченню емісій ПХДД/ПХДФ і ПХБ на таких підприємствах є переробка відпрацьованих олив з низькими концентраціями ПХДД/ПХДФ і ПХБ. Регенована олива має містити не більше 50 мільйонних часток (мг/л) полі хлорованих біфенілів та трифенілів.

Європейська асоціація промисловості повторного очищення (Groupement Europeen de l'Industrie de la Regeneration; GEIR) рекомендує, щоб при регенерації перевага віддавалася тим видам відпрацьованих олив, що не містять хлор [3, с. 11].

У країнах Європейського Союзу на сьогодні діє директива Ради 75/439/ЕЕС, спрямована на утворення уніфікованої системи збирання, переробки, зберігання та видалення відпрацьованих олив. Директива дозволяє країнам-членам ЄС компенсувати компаніям витрати на збирання та видалення відпрацьованих олив.

Найбільш пріоритетним вважається регенерація відпрацьованих олив, а не їх спалення; менш пріоритетним – їх знищення, контрольоване зберігання або заховання. Країни-члени ЄС мають забезпечувати безпечне збирання та видалення відпрацьованих олив. Заборонено скидати такі відходи у водні об'єкти або дренажні системи.

Будь-яке підприємство, що займається видаленням відпрацьованих олив, повинне отримати дозвіл від компетентного органу. А підприємства, що займаються збиранням відпрацьованих олив, мають проходити реєстрацію та контролюватися [3, с. 11; 4, р. 1300–1301; 5, с. 15;

6, р. 263–264]. Існують спеціально розроблені паспорти безпеки хімічної продукції, до якої відносяться і нафтопродукти. В таких паспортах обов'язково присутній розділ, що містить екологічну інформацію, зокрема:

- оцінку можливих потенційних впливів на навколишнє середовище;
- найбільш важливі характеристики впливу хімічної продукції на навколишнє середовище.

До останнього пункту відносять інформацію щодо хімічної, біологічної трансформації, здатності до біокумуляції, персистентності і біодеградації (розкладання), дані по екотоксичності, гігієнічні нормативи в різних сферах. Також там повинна бути приведена інформація щодо будь-яких інших несприятливих впливах на навколишнє середовище, таких як загибель флори, фауни, корозія ґрунтів, спустелювання території, можливе руйнування озонового шару землі, глобальне потепління клімату.

В Україні поводження з відпрацьованими нафтопродуктами підпадає під дію ряду міжнародних директив та внутрішніх правил залізничної інфраструктури (рисунок 2).

### 4. Сучасний стан проблеми на залізницях

По використанню моторних олій та палив на першому місці в Україні знаходиться Дніпропетровська область. Якщо аналізувати по галузях економіки, то перше місце належить сільському господарству (на нього приходить 35,4% від загального використання різних типів олій), залізничний транспорт разом з автомобільною промисловістю та транспортними засобами знаходиться на четвертому місці (13%). В цілому по оцінкам експертів використання олій суттєво зростає з кожним роком.

Аналіз сучасного стану проблеми у сфері поводження з нафтовмішувочими відходами показав, що вона гостро постала і перед лінійними підрозділами залізниць України [3, с. 52; 4, р. 1300; 6, р. 264; 7, р. 8]. Так, згідно статистичних даних залізничних підприємств, поміж інших відходів значними об'ємами утворення відрізняються технологічні шлами і відпрацьовані оливи, які є небезпечним джерелом аренів, важких металів, бенз(а)пірену, олефінів, сполук сірки, азоту та ін.

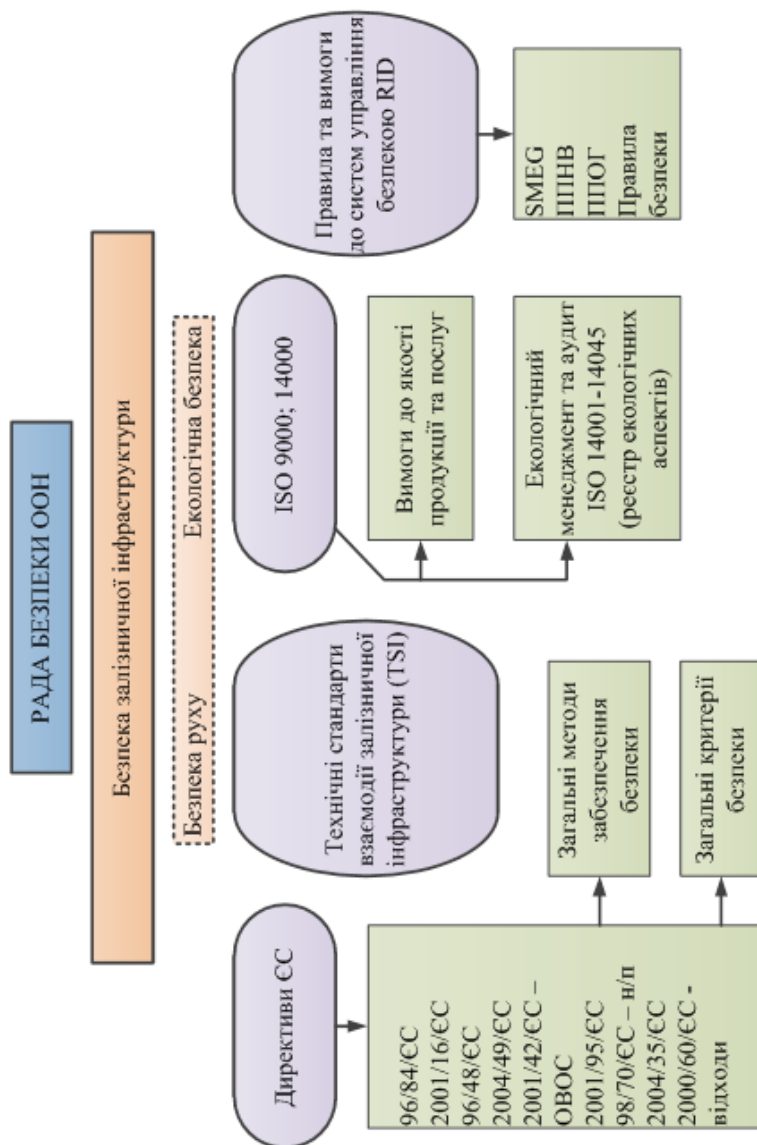


Рис. 2. Ресурсозбереження та екологічна безпека при поводженні з відпрацьованими нафтопродуктами на залізниці (перелік вимог)

Наприклад, нафтовміщуючі шлами лінійних підрозділів залізниць накопичуються у стічних водах підприємств після обмивки вагонів, тепловозів та їх деталей, тому найбільша їх кількість утворюється у вагонних і пасажирських депо залізниць, т. я. саме тут проводять обмивку рухомого складу при проведенні ремонтних робіт.

Зовні відходи технологічних шламів представляють собою масу коричневого кольору, яка має грудкувату структуру. Нафтошлами відрізняються різноманітним складом; в них присутні нафта, вода, нафтові емульсії, асфальтени, гудрони, іони важких металів, різноманітні механічні домішки та радіоактивні елементи. Найчастіше технологічні шлами відносяться до третього класу небезпечності і являються помірно небезпечними. Цей клас небезпеки обумовлюється вмістом у цих відходах ряду важких металів, зокрема свинцю, цинку, нікелю та інших (таблиця 1).

Таблиця 1

**Аналіз технологічного шламу, що зазвичай утворюється  
на залізничних підприємствах**

Вміст металу, мг/кг, клас небезпечності	Форма присутності		
	Валова	Рухома	Вміст у відходах, кг/т
Pb (1)	37	0	0,037
Zn (2)	23,8	6,2	0,023
Ni (2)	13	3,5	0,013
Cu (2)	5	2	0,005
Cr (2)	10	0	0,01
Mn (3)	8,8	3,5	0,008

Моторні оливи в процесі роботи в двигуні внутрішнього згоряння значно змінюють свої властивості з наступних причин:

1. «виснажуються» присадки, наприклад, миючі сприяють потемнінню кольору оливи, загущуючі присадки розриваються на дрібні молекули, що призводить до зменшення в'язкості оливи.

2. Олива окиснюється під дією кисню повітря (молекули оливи поєднуються з ним і темніють з утворенням смолистих речовин).

3. До оливи потрапляють механічні домішки і продукти згоряння.

4. Відбувається обводнення, що сприяє розвитку корозійних процесів.

Відсутність на залізницях устаткування для утилізації цих відходів та зменшення їх негативного впливу на довкілля вказує на необхідність розроблення сучасної адаптованої до умов виробничого процесу технології, за допомогою якої можна було б скоротити обсяги цих відходів і тим самим зменшити масштаби їх впливу на навколишнє природне середовище. В результаті її впровадження можна отримати значні як екологічні, так і економічні ефекти [7, р. 8–10; 8, р. 1095; 9, р. 177; 10, р. 1341].

Нами був проведений аналіз різних характеристик оливи, що використовуються на тяговому рухомому складі залізниць України. В результаті аналізу обсягів утворення виявлено, що у найбільшій кількості ці оливи використовуються підприємствами локомотивної служби, і відповідно ці підрозділи є найбільшими вкладниками в утворення оливовамісних відходів.

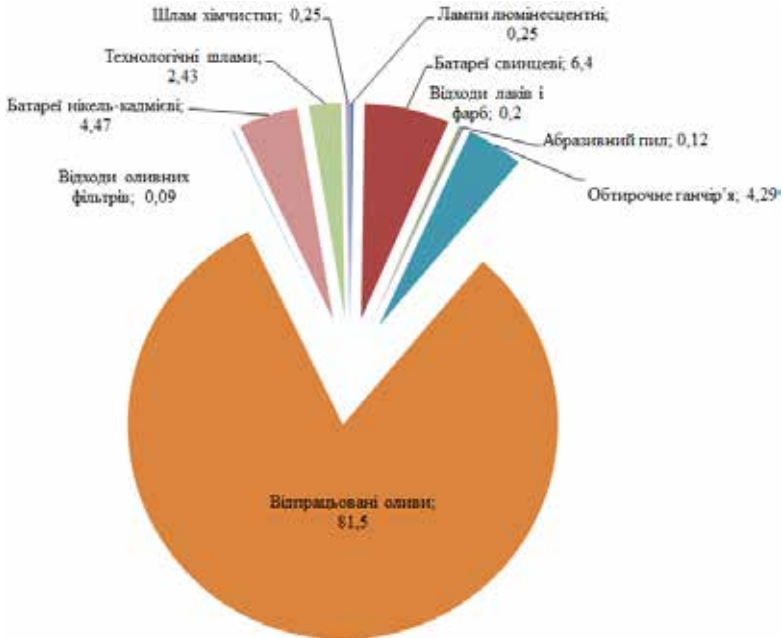
Утворення відходів на підприємствах локомотивної служби (у процентному співвідношенні за рік) зображено на рисунку 3, на якому можна побачити, що оливи є на таких підприємствах основними за кількістю відходами.

Так, при заміні оливи з одного тепловоза зливають близько 550 кг відпрацьованої моторної оливи (для тепловозів типу ЧМЭЗ). У залежності від кількості одиниць рухомого складу, що обслуговуються в локомотивному депо, та об'ємів виробництва залізничного підприємства за рік в депо може утворюватися до 100 т відпрацьованої оливи.

Моторна олива – це один із найважливіших елементів у конструкції двигуна, який призначений для довгострокової та надійної підтримки його роботи, забезпечення заданого ресурсу двигуна. Виконання цих функцій можливе лише при точній відповідності її властивостей тим термічним, механічним і хімічним впливам, яким олива піддається в процесі роботи, а саме в оливній системі двигуна, на поверхнях, що змащуються та охолоджуються. Взаємна відповідність конструкції двигуна, умов його експлуатації і властивостей оливи – одна з найважливіших умов досягнення високої надійності двигунів.

Свіжа моторна олива на вигляд являє собою прозору, в'язку рідину, що складається з базової сировини і присадок до неї.

У процесі роботи олива поступово забруднюється різноманітними металевими часточками, що потрапляють у неї в результаті стирання



**Рис. 3. Утворення відходів на підприємствах локомотивної служби у процентному співвідношенні за рік**

металевих поверхонь деталей, мінеральними домішками, які опиняються в оливній системі через повітря та можуть викликати інтенсивне зношування обладнання, розріджується паливом, що значно знижує її температуру спалаху, адгезію та в'язкість. Неповне згоряння палива викликає потрапляння у картер смолисто-сажистих часток, що забруднюють оливу та інтенсифікують лако- і нагароутворення.

Крім того, в оливу із продуктів згоряння палива, навколишнього повітря, нещільності у водяних охолоджуючих приладах може потрапляти вода; присутність її дуже негативно впливає на такі властивості олив, як корозійна стійкість, стійкість до окиснення. При потраплянні води руйнується оливна плівка в підшипниках колінчастого валу і антифрикційний шар підшипників, посилюється зношення і корозія деталей двигунів, з'являються згустки, які забивають оливопровід

та ускладнюють потрапляння оливи до деталей. Також вода утворює стійку емульсію з оливою, що не тільки погіршує якість оливи, а й ускладнює її подальшу регенерацію.

Через взаємодію з нагрітими частинами обладнання олива зазнає термічного розкладення, також вона окислюється під дією кисню повітря. Деякі метали, наприклад, залізо, свинець, цинк та інші, можуть виступати каталізаторами процесу окиснення. Пришвидшувати окиснення може і вода. Окрім процесів розкладання та окиснення паралельно можуть іти вторинні процеси полімеризації та конденсації.

Деякі продукти окиснення та ущільнення (асфальтени, карбоїди) нерозчинні в оливі; вони можуть утворювати колоїдні системи та випадати в осад у вигляді шламоподібних продуктів і поступово забруднювати оливопродукти, порушувати циркуляцію оливи, викликати утворення нагару.

Також на оливу діють такі фактори навколишнього середовища, як тиск, електричне поле та природне освітлення [3, с. 53–57; 11, с. 82–83].

Як результат, олива повністю змінює свої характеристики, втрачає основні експлуатаційні властивості і стає дуже густою мулоподібною речовиною чорного або темно-коричневого кольору, густою сумішшю різного роду рідин з добавками твердих речовин – оксидів металів, продуктів зносу.

На підприємствах залізничного транспорту для тягового рухомого складу існує певний перелік бракувальних норм – числових значень параметрів якості, при досягненні яких мастильні матеріали втрачають функціональні властивості.

Дані аналізів порівнюють з бракувальними показниками і таким чином оцінюють експлуатаційну придатність оливи. Олива, що не набула бракувальних параметрів може використовуватись у подальшому; до того моменту, доки хоча б один із бракувальних показників не буде перевищений таку оливу вважають експлуатаційною, тобто такою, що в повній мірі забезпечує надійну роботу двигуна.

Відбракована і злита з картера при плановій заміні олива підлягає передачі на регенерацію. Після вивчення існуючих технологій та схем регенерації відпрацьованих моторних олив на залізничному транспорті України було з'ясовано, що заходів по відновленню відпрацьованих олив майже не проводиться, а ті найпростіші фізичні методи, що існують, мають низький ефект очистки і вихід очищеного продукту, а тому вимагають удосконалення.



### **5. Розроблення схеми поводження з відпрацьованими оливами**

Проаналізувавши ситуацію, яка склалася, ми прийшли до висновку, що відсутність на залізницях устаткування для утилізації цих відходів та зменшення їх негативного впливу на довкілля вказує на необхідність розроблення сучасної адаптованої до умов виробничого процесу технології, за допомогою якої можна було б скоротити обсяги цих відходів і тим самим зменшити масштаби їх впливу на навколишнє природне середовище. В результаті її впровадження можна отримати значні як екологічні, так і економічні ефекти.

Після аналізу існуючих напрямків підвищення рівня екологічної безпеки при поводженні з відпрацьованими оливами та узагальнення робіт, присвячених розробленню природоохоронних заходів з метою зниження техногенного навантаження, спричиненого їх впливом на довкілля, були проведені експериментальні дослідження по відновленню олив з використанням різних методів. Зокрема випробувані найпростіші фізичні методи, методи з використанням сорбентів різного походження (цеолітів, керамзиту, діалюмінію триоксиду), експерименти з використанням класичного сульфатнокислотного методу очищення відпрацьованих олив, випробуваний метод очищення відпрацьованих олив з використанням різних типів поверхнево-активних речовин (ПАР).

Найкращий результат було досягнуто сумісним використанням ПАРи неолу та алкілбензосульсокислоти (АБСК) – замінника сульфатної кислоти. Так, для оливи М-14В2, яка широко застосовується на залізниці, ефект очистки склав 95,08%; при цьому максимальний вихід очищеної оливи при цьому склав 90,01% [3, с. 87; 12, с. 19–20].

В результаті була запропонована схема поводження з оливами, надані рекомендації щодо поводження з ними після відбракування (рисунок 4). Основні складові запропонованої схеми це ємкість-усереднювач, ємкості для зберігання основних реагентів, змішувачі, центрифуга, насоси-дозатори, нафтошламонакопичувач.

При розробці загальної схеми відновлення експлуатаційної якості відпрацьованих моторних олив ми виходили з результатів проведених лабораторних досліджень по випробуванню різних методів очищення та оптимізованого варіанту обраної технології, а саме з температурних умов, кількості реагентів та часу їх контактування з оливою.

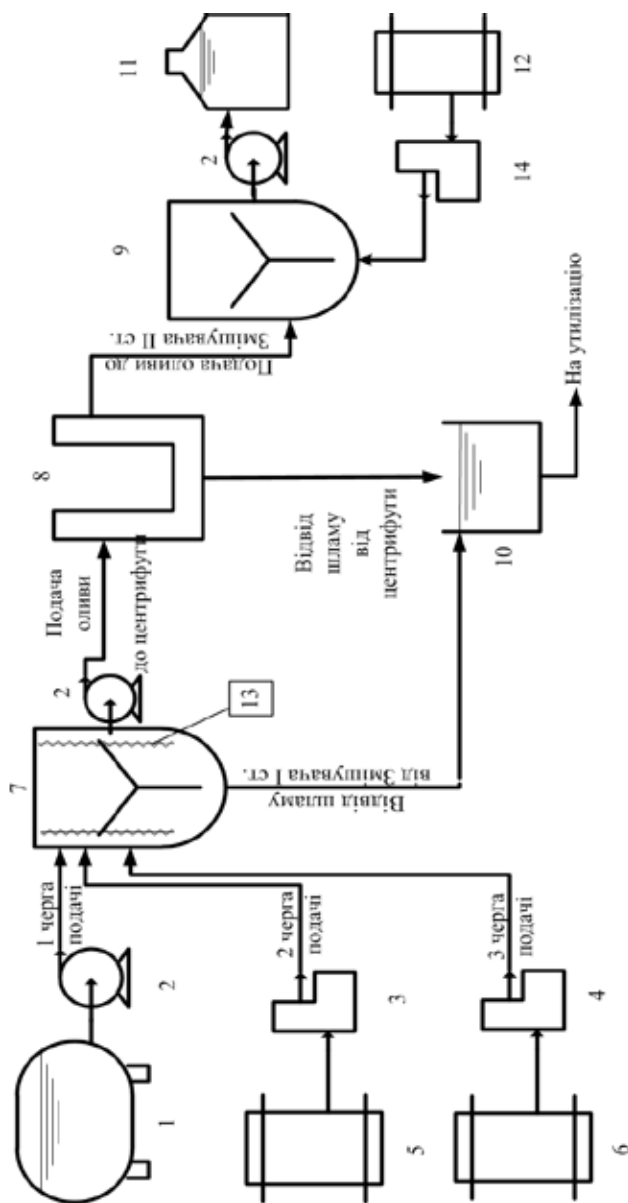


Рис. 4. Устаткування для проведення заходів щодо відновлення відпрацьованих олів після відбракування:

- 1 – усереднювач; 2 – насос; 3 – насос-дозатор АБСК; 4 – насос дозатор неолу; 5 – тара для зберігання АБСК; 6 – тара для зберігання неолу; 7 – змішувач першої ступені; 8 – змішувач; 9 – центрифуга; 10 – резервуар для зберігання відновленої оливи; 11 – тара для зберігання присадки; 12 – нагрівальний елемент; 13 – насос-дозатор присадки

## 6. Вивчення токсикологічних властивостей олив

Як вже зазначалось вище, основні токсикологічні властивості нафтовмісних відходів, зокрема відпрацьованих олив, обумовлюються такими сполуками, як бенз(α)пірен, фурани, діоксини, поліхлордіфеніли та інші. Саме тому нами була приділена увага вмісту у відпрацьованих та очищених за запропонованою схемою оливах важких металів та хлорвмісних сполук, які і формують негативний токсикологічний профіль цих відходів.

Була проведена перевірка свіжих, відпрацьованих та відновлених за запропонованими нами схемами оливи М-14В<sub>2</sub> на вміст в них бенз(α)пірену, важких металів (свинцю, нікелю, купруму, кобальту, хрому, цинку) та хлорид-іонів.

Варто відзначити, що якісне визначення хлору проводилось по зеленому забарвленню полум'я при внесенні в нього мідної проволочки з оливою. Це дозволяє виявити присутність елементу в кількості не менше 0,3%.

Також при проведенні досліджень, що проводився у ліцензованій спеціалізованій лабораторії Державного управління охорони навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області, для визначення бенз(α)пірену використовувалась методика рідинної хроматографії; для визначення важких металів – метод атомно-абсорбційної спектроскопії. Отримані результати наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Порівняння екологічних показників свіжих, відбракованих та відновлених олив М-14В<sub>2</sub>**

Вміст в оливі	Показник							
	Бенз(α)пірен, мг/кг	Хлорид-іон	Важкі метали (валова кількість, мг/кг):					
			Свинець	Нікель	Купрум	Кобальт	Хром	Цинк
У свіжій	-	Відс.	35	-	12	-	-	-
У відбракованій	13	Відс.	69	26	34	-	-	24
У відновленій	-	Відс.	12	4	5	-	-	3

Після обробки отриманих даних нами були зроблені наступні висновки:

1. Бенз(α)пірен з'являється при роботі олив обох марок, і він повністю зникає з них після обробки за запропонованими схемами;

2. Хлорид-іони відсутні в оливах в усіх стадіях, що підтверджує їх безпечність та екологічність запропонованих схем відновлення;

3. Важкі метали присутні у відпрацьованих оливах, що підвищує їх екологічну небезпеку, а також говорить про незадовільну роботу дизелів (відповідно до рекомендацій Організації співдружності залізниць) Значне зниження кількості цих токсичних елементів (свинцю на 82,61%; нікелю на 84,62%, купруму на 85,29%, цинку на 87,50%; для оливи М-14Г<sub>2</sub>ЦС – свинцю на 88,24%, нікелю на 86,67%, купруму на 84,09%, хрому на 83,33%, цинку на 90,91%) після обробки олив за запропонованими схемами підтверджує безпечність відновлених олив та екологічність самих схем [3, с. 100–101; 13, с. 147–148].

Таким чином, шляхом впровадження запропонованої схеми вирішуються наступні екологічні проблеми залізниць:

- мінімізується кількість відпрацьованих олив – основного за об'ємом відходу підприємств локомотивного господарства;

- відбувається повернення цінної сировини (оливи) у технологічний процес у вигляді відновленої моторної оливи;

- отримані відновлені оливи не мають такої ж ступені токсичності, як відпрацьовані оливи, а тому не становлять загрози для довкілля.

На основі запропонованої схеми також розроблена і запропонована еколого-хіммотологічна схема поводження з відпрацьованими оливами (на прикладі оливи М-14В<sub>2</sub>) на залізниці (рис. 5).

## 7. Висновки

1. Досліджені основні показники, які формують токсикологічний профіль нафтовміщуючих відходів.

2. Проаналізовані міжнародні конвенції, домовленості та вимоги щодо складу та поводження з нафтовмісними відходами.

3. Проведені експериментальні дослідження по відновленню олив з використанням різних методів.

4. Випробуваний метод очищення відпрацьованих олив з використанням різних типів поверхнево-активних речовин (ПАР) та

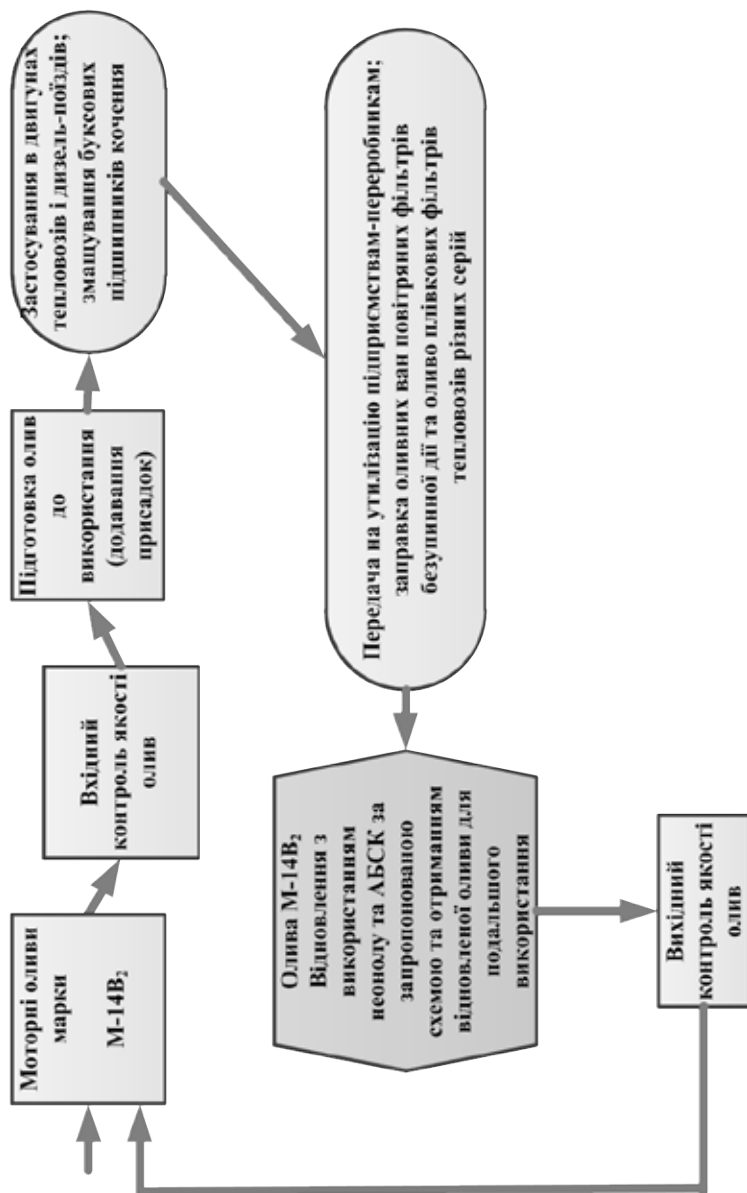


Рис. 5. Функціональна еколого-хіммотологічна схема поводження з відпрацьованими оливами на залізничному транспорті

замінника сульфатної кислоти – алкілбензосульфо кислоти (АБСК). Найкращий результат досягається сумісним використанням ПАРИ неонулу та АБСК.

5. Досліджені екологічні показники якості свіжих, відбракованих та очищених за запропонованою схемою олив. Виявлено значне зменшення кількості або повну ліквідацію присутності у відновлених оливах важких металів, хлоридів та бенз(α)пірену.

6. Запропонована схема відновлення відпрацьованих олив, яка сприятиме підвищенню екологічності використання відпрацьованих моторних олив залізниць. Такі заходи мінімізують кількість відходів, знизять навантаження на навколишнє природне середовище відпрацьованих олив та дозволять отримати певний економічний ефект.

7. На основі запропонованої схеми також розроблена і запропонована еколого-хіммотологічна схема поводження з відпрацьованими оливами на залізниці.

8. Отримані результати досліджень можливо використати у подальшій роботі, зокрема підборі устаткування та проведенні подальших стендових та промислових випробувань.

### Список літератури:

1. Катрушов О.В. Патогенна дія відпрацьованих моторних масел: недооцінена небезпека / О.В. Катрушов, В.О. Костенко, І.В. Батухіна [та ін.] // Актуальні проблеми сучасної медицини: Вісн. Української мед. стоматол. академії. – 2009. – Т. 9, № 3. – С. 188–193.
2. Ssempebwa J. Waste crankcase oil: an environmental contaminant with potential to modulate estrogenic responses / J. Ssempebwa, D. Carpenter, B. Yilmaz [et al.] // J. Toxicol. Environ. Health. – 2004. – V. 67, № 14. – P. 1081–1094.
3. Зеленько Ю.В., Тарасова Л.Д., Безовська М.С. Підвищення рівня екологічної безпеки при поводженні з відпрацьованими моторними оливами залізничної інфраструктури: [монографія] / Ю.В. Зеленько, Л.Д. Тарасова, М.С. Безовська. – Д. : Вид-во «Літограф», 2016. – 150 с.
4. The Assessment of Negative Impact of Oil Products on Railroad Track and Rolling Stock Constructions / Yu. Zelenko, O. Lunys, L. Neduzha, S. Steišūnas // Proc. of 23rd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2019». – 2019. – P. 1300–1306.
5. Мямлін С.В. Параметрична екологія на залізничному транспорті. Принципи, оцінка, контроль, безпека: Монографія / С.В. Мямлін, Ю.В. Зеленько, Л.О. Недужа. – Д. : Літограф, 2014. – 203 с.
6. Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A. The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine, Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 10(3). – 2005. – P. 263–268.

7. Zelenko Yu. Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport / Zelenko Yu., Myamlin S., Sandovskiy M. – Д. : Издательство Литограф, 2014. – 332 с.
8. Klimenko, I. Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear / I. Klimenko, J. Kalivoda, L. Neduzha // Proc. of 22nd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2018». – 2018. – P. 1095–1098.
9. Kalivoda, J., Neduzha, L. (2019). Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive. Proc. of 25th Intern. Conf. «Engineering Mechanics 2019», – P. 177-180. doi: 10.21495/71-0-177
10. Lunys, O. Stability Research of the Main-Line Locomotive Movement / O. Lunys, L. Neduzha, V. Tatarinova // Proc. of 23rd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2019». – 2019. – P. 1341–1345.
11. Татарінова В.А. Застосування програмних комплексів при дослідженні стану транспортних засобів / В.А. Татарінова, Я. Калівода, Л.О. Недужа // Вісник сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 04 (50). – С. 82–91.
12. Зеленько Ю.В. Розробка інноваційних ресурсозберігаючих технологій утилізування нафтовміщуючих відходів / Ю.В. Зеленько, М.С. Безовська, А.Л. Лещинська // Журнал «Технологический аудит и резервы производства» / За ред. Дмитрімова В.П., Дуднікова А.А., Біловода О.І. [та ін.]. – Харків : ПП «Технологічний центр», 2013. – № 1/2(9). – С. 17–21.
13. Безовська М.С. Новітні еколого-хіммотологічні моделі поводження з відпрацьованими оливами залізниць / М.С. Безовська, Ю.В. Зеленько // Общегосударственный научно-технический журнал «Вопросы химии и химической технологии» / Под ред. Николаенко Н.В., Баштанника П.И., Начовного И.И. – Днепропетровск : «Новая идеология», 2012. – № 1. – С. 145–148.

### References:

1. Katrushov A.V., Kostenko V.A., Batuhina I.V., Solovjova N.V., Filatova V.L. (2009). Pathogenous effect of used motor oil: underestimated contamination hazard. Actual Problems of the Modern Medicine: Bulletin of Ukrainian Medical Stomatological Academy. Vol. 9, № 3. P. 188–193.
2. Ssempebwa J., Carpenter D., Yilmaz B. [et al.] (2004). Waste crankcase oil: an environmental contaminant with potential to modulate estrogenic responses. J. Toxicol. Environ. Health. Vol. 67, № 14. P. 1081–1094.
3. Zelenko Yu.V., Tarasova L.D., Bezovska M.S. (2016). Pidvyshhennja rivnja ekologichnoji bezpeky pry povodzhenni z vidpracjovanyjmy motornymy olyvamy zaliznychnoji infrastruktury: monohrafija [Improvement of the level of environmental safety in the management of waste engine oils of railway infrastructure: monograph]. Dnipropetrovsk: Lithographer Publ. (in Ukrainian)
4. Zelenko Yu., Lunys O., Neduzha L., Steišūnas S. (2019). The Assessment of Negative Impact of Oil Products on Railroad Track and Rolling Stock Constructions. Proc. of 23rd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2019» (Lithuania, Palanga, October 2-4, 2019). P. 1300–1306.

5. Myamlin S.V., Zelenko Yu.V., Neduzha L.O. (2014). Parametric environment in railway transport. Principles, assessment, monitoring, security: monograph. Dnipropetrovsk: Lithographer Publ. (in Ukrainian)
6. Plakhotnik V.N., Onyshchenko Ju.V., Yaryshkina L.A. (2005). The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine, Transportation Research Part D: Transport and Environment. № 10(3). P. 263–268.
7. Zelenko Yu., Myamlin S., Sandovskiy M. (2014). Scientific foundation of management of the environmental safety of oil product turnover in railway transport. Dnipropetrovsk: Lithographer Publ.
8. Klimenko I., Kalivoda J., Neduzha L. (2018). Parameter Optimization of the Locomotive Running Gear. Proc. of 22nd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2018» (Lithuania, Trakai, October 3-5, 2018). P. 1095–1098.
9. Kalivoda, J., Neduzha, L. (2019). Simulation of Safety Against Derailment Tests of an Electric Locomotive. Proc. of 25th Intern. Conf. «Engineering Mechanics 2019» (Czech Republic, Svratka, May 13-16, 2019). P. 177–180.
10. Lunys O., Neduzha L., Tatarinova V. (2019). Stability Research of the Main-Line Locomotive Movement. Proc. of 23rd Intern. Scientific Conf. «Transport Means. 2019» (Lithuania, Palanga, October 2-4, 2019). P. 1341–1345.
11. Tatarinova V.A., Kalivoda J., Neduzha L.O. (2018). Zastosuvannya programnykh kompleksiv pry doslidzhenni stanu transportnykh zasobiv [Application of Software Tools in the Research of Vehicles]. Вісник сертифікації залізничного транспорту. № 04(50). P. 82–91.
12. Zelenko Yu.V., Bezovska M.S., Leshchynska A.L. (2013). Rozrobka innovacijnykh resursozberighajuchykh tekhnologij utylizuvannja naftovmishhujuchykh vidkhodiv [Development of innovative resource-saving technologies for the disposal of oil-containing waste]. Technology audit and production reserves. № 1/2(9). P. 17–21.
13. Bezovska M.S., Zelenko Yu.V. (2012). Novitni ekologho-khimotologhichni modeli povodzhennja z vidpracjovanymy olyvamy zaliznycj [Newest ecological and chemotological models of railways waste oil treatment]. The Issues of Chemistry and Chemical Technology. № 1. P. 145–148.



**STRESSED-DEFORMED CONDITION  
AND DESTRUCTION OF TECHNOLOGICALLY  
DAMAGED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

**Hanna Zinchenko<sup>1</sup>**

**Vitaliy Dorofeyev<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-56>

**Abstract.** The studies, conducted by the authors over the past 30 years have shown that reinforced concrete structures in the process of processing into products receive technological (hereditary) damage at the micro and macro levels. The resulting damage and structural imperfections affect the operation and behavior of structures during operation. They change the strength, deformability, stress-strain state, the nature of the appearance and the development of force cracks, as well as the durability of the structures and systems. Therefore, it is important to analyze the occurrence of technological cracks and the causes of their genesis in reinforced concrete structures at micro and macro levels, the effect of this damage on the stress-strain state, crack resistance, deformability and durability during the operation. The subject of the study is concrete mixtures with different ratios of initial components, reinforced concrete structures that have got initial (technological) damage and the stress-strain state of bent elements at the crack tip, taking into account the dispersed damaging of the material structure. For the description of non-homogeneity of the material, linear and structural mechanics, as well as micromechanics, were used. Micromechanics allowed us to describe the interaction processes that occur between the individual components during the operation of the material and structure. The photoelasticity method made it possible to determine the stress distribution in regular-structure composites before cracks appeared at the micro level with stress concentration on inclusions. This made it possible to use the relations of the linear theory of elas-

---

<sup>1</sup> Postgraduate Student of Reinforced Concrete Constructions and Transport Structures Department, Odessa State Academy of Building and Architecture, Ukraine

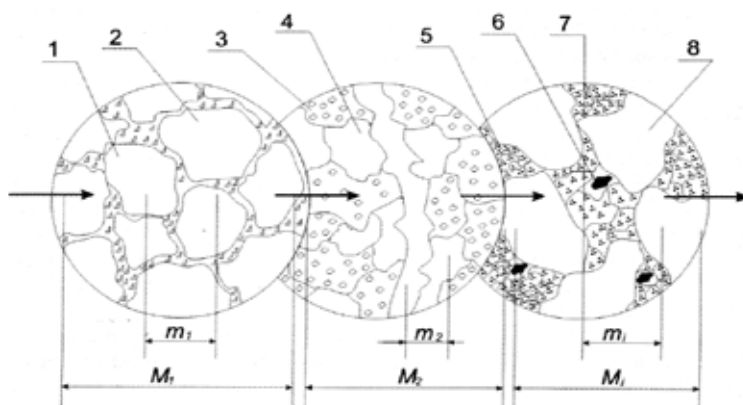
<sup>2</sup> Doctor of Technical Science, Professor of Engineering Constructions and Water Research Department, Odessa National Maritime University, Ukraine

ticity for a piecewise homogeneous body without discontinuities and cracks. We investigated the two-dimensional stress distribution: plane strain or plane stress state. To describe the two-dimensional stress state, we used the apparatus of the theory of analytical functions of a complex variable proposed by Kolosov and developed by Muskhelishvili. The graphoanalytical method was used when analysing the mechanism of structure formation of the materials at the macro level. When analyzing flat models of structural concrete, the shape of the placeholders is taken in the form of squares. An asymptotic study of stress fields in the vicinity of the tip of a force crack, taking into account the mixed stress, is an important task of nonlinear fracture mechanics, and in particular, taking into account the presence of a scattered damage field. Therefore, the study of the stress and strain field near the crack tip under tensile and shear loads is of particular relevance when calculating the bearing capacity and deformability of structures. The aim of the work is to study and generalize crack formation in the materials and reinforced concrete structures at micro and macro levels, the influence of technological damage on the development of cracks from external influences and loads, the determination of the stress-strain state at the crack tip from external influences and loads, and the influence of technological cracks on the bearing ability, deformability and operational characteristics of structures. The use of the apparatus of the theory of analytical functions of a complex variable made it possible to obtain numerical results, characterizing the initial stage of material operation (the formation of diffuse damage) for any characteristics of materials, forms of inclusions and external influences. The study of mechanisms of formation macrostructure concretes showed that the reasons of genesis and the development of discontinuity in hardening matrix material that degenerate in the internal surface of the process section or cracks are strain gradients. Following the algorithm, it is possible to obtain eigenvalues for constructing a multiscale, multilevel description of fracture processes in the vicinity of the crack tip that lead to loosening of the material, crack growth, and structural failure.

## **1. Introduction**

It is known [1, p. 5-99] that reinforced concrete structures in the process of processing into products get technological damage at micro and macro levels. When analyzing the structures of materials, it is customary to distinguish certain types of them by size. Such an artificial identification of struc-

tural levels makes it difficult to assess the degree of danger of defects in the analysis of the physicommechanical properties of materials. It is considered dangerous to attribute defects, which size is larger than the size of the constituent structural elements. Therefore, a defect size that is safe at one structural level becomes dangerous for a lower scale level. At each selected level of structural heterogeneity, the material can be described using linear mechanics or micromechanics. Representation of the material as a complex medium involves the allocation of a volume in which the individual properties of the components are leveled (Figure 1).



**Figure 1. The organization of the structure of composite building materials:**

- 1 – elementary structural element of a binder; 2 – filler; 3 – cement stone;
- 4 – fine aggregate; 5 – macrostructural cracks; 6 – pores; 7 – soution part (matrix);
- 8 – coarse aggregate;  $m_1, m_2, M_1, M_2, \dots, M_i$  – structural scale levels, which are averaged individual structural inhomogeneity  $m_i$

The identification of the features of the interaction of the individual components allows to reveal the mechanism of formation of average characteristics at the level  $M_i$ . In turn, the analysis of the interaction at levels structures  $M_1, M_2, \dots, M_i$  (taking into account interaction of the components structures  $m_1, m_2, \dots, m_i$ ) reveals mechanism of the physico-mechanical characteristics of composite building materials with layered structure organization.

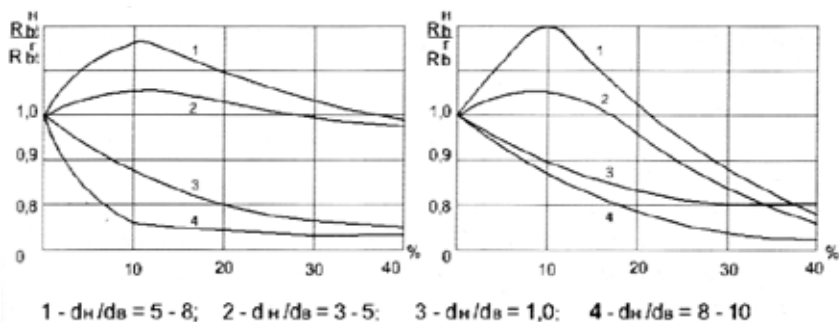
The appearance and development of cracks in hardening materials depends on the number of interacting phases  $v$ , their mechanical characteristics, the geometric parameters of the heterogeneous system, the geometric characteristics of the sample or structure, the magnitude and kinetics of the development of intrinsic volumetric deformations, the change in the rheological characteristics of the hardening system, the intensity and parameters of technological influences. Studies have shown that for a qualitative description of the physicommechanical processes of structure formation and destruction of materials and the establishment of qualitative relations, it is sufficient to distinguish two structures: micro and macro levels. At the micro level, the characteristic structure of the heterogeneity of the material is the "binder-filler". The macrostructure is represented by the solution-aggregate heterogeneity. Moreover, each selected structure consists of structures of a lower scale level, and sprouting from one to another scale levels, they interact with each other. The structure organization is most clearly traced in concrete: from submicrocrystals of the gel component with a size of  $10^{-10} \dots 10^{-8}$  to heterogeneity "mortar-aggregate" with a size of  $2 \times 10^{-2}$  st.

## **2. The mechanism of cracks genesis in the microstructure of concrete**

The analysis of the formation of structures at the micro level shows that the use of fillers will let increase the strength of composite building materials [2]. It is associated with an increase of the destruction energy of a heterogeneous medium. Dispersed particles are able to interact with the front of the cracks. Therefore, the fracture energy is associated with the fracture energy of the matrix material, the linear energy per unit length of the crack front and the distance between discrete particles. The size of a fracture crack depends on the specific surface energy, stress concentration in the region of the crack mouth, the module of elasticity of the material, and the maximum stress value, they harden the material by restraining the directional movement of dislocations. The line of dislocations bends between the particles in loops, that have different signs behind each particle, which causes them to close, annihilate, and form dislocation fields around the particles.

The effect of fillers on the strength of materials is valid for a group of materials consisting of an isotropic matrix in which filler particles of the same size are evenly distributed [2, p. 35–41]. In this case, the interface between the matrix material and inclusions can serve as a source of crack

genesis and decrease in the strength of the material, or as a kind of stopper for the genesis and development of cracks, and increase the mechanical characteristics of the material [3, p. 23–27]. It can be concluded that the strength of composite building materials at the microlevel is determined by its heterogeneity. Therefore, the strength of such filled systems will depend on both the amount of fillers and their dispersion (Figure 2).



**Figure 2. The effect of the amount and dispersion of the filler on the strength of the filled compositions**  
**a – n / a – constant; b –  $S_n$  – constant**

$$R = f(V_H, S_H, \gamma_m, \gamma_n, \dots) \quad (1)$$

It can be concluded that for composite building materials, the heterogeneity of which is determined by the internal interstructural interfaces, strength fulfills the function of internal hereditary cracks. In turn, the number of internal cracks and their extent depends on the ratio of surface activities of binder grains and filler particles that determines the dispersion and amount of filler. It can also be concluded that the strength of the microstructure of materials is a function of their heterogeneity that is determined by intercluster interfaces, and can be controlled by introducing a certain amount of fillers into the system that are characterized by surface activity and dispersion.

As a comparison of the results obtained experimentally (by the photoelastic method) for composites of regular structure shows [2, p. 25], the stress distribution in them before the appearance of cracks is fairly well described by a linear model. At the initial stage of the work of the

material during the formation of cement stone, shrink stresses are manifested. Material properties do not depend on the load level yet, and stress concentration occurs at the inclusions. By inclusion we will mean an area with modified properties. This makes it possible to use the relations of the linear theory of elasticity for a piecewise homogeneous body without discontinuities and cracks. The latter is due to the fact that the appearance of microcracks indicates a significant nonlinear stage of the work of the material, and therefore the stage of the appearance of microcracks is excluded from the initial stage of the work of the material. In the future, we will study only the two-dimensional distribution of stresses: plane strain or plane stress state. On one hand, these rays are widespread in the practice of construction, and on the other, an exceptionally powerful apparatus is developed for describing a two-dimensional stress state in the mathematical theory of elasticity – an apparatus of the theory of analytic functions of a complex variable, first used by Kolosov and developed by Muskhelishvili [4, p. 270]. The use of this apparatus makes it possible to obtain numerical results, characterizing the initial stage of the composite for any characteristics of materials, forms of inclusions and external influences.

The solution of the posed problems is reduced to the determination of two functions  $\phi(z)$  and  $\psi(z)$  to the complex variable  $z = x + iy$ . The components of the stress state are expressed in terms of  $\phi(z)$  and  $\psi(z)$  by ratios help:

$$\begin{aligned} f(\theta = 0) = 1, \quad f'(\theta = 0) = -(\lambda + 1) / \operatorname{tg}(M^p \pi / 2), \\ f''(\theta = 0) = A_2, \quad f'''(\theta = 0) = A_3, \end{aligned} \quad (2)$$

$\operatorname{Re} \phi'(z)$  – a material part of analytic functions  $\phi(z)$ .

And moving:

$$2\mu(u - iv) = x\phi(z) - z\overline{\phi'(z)} - \overline{\psi(z)} \quad (3)$$

The determination of the desired functions was carried out from the system of functional equations:

$$\begin{aligned} \frac{x}{\mu} \phi(t^{(m)}) - \frac{1}{\mu} \left[ t^{(m)} \overline{\phi'(t^{(m)})} + \overline{\psi(t^{(m)})} \right] - \frac{x_0}{\mu_0} \phi_m(t^{(m)}) + \frac{1}{\mu_0} \left[ t^{(m)} \overline{\phi'(t^{(m)})} + \overline{\psi_m(t^{(m)})} \right] = g(t^{(m)}); \\ g(t^{(m)}) = g_1(t) + ig_2(t); \\ t^{(m)} \in \Gamma^{(m)}; m = 0.1... \end{aligned} \quad (4)$$

Note, that  $g(t)$  determines the amount of displacement that should be set at the point  $t^{(m)}$  kernel  $\Omega^{(m)}$  in order to combine it with the point  $t^{(m)}$  element of the boundary  $t^{(m)}$  domain  $\Omega$  when the latter is in an undeformed state. For example, in the case of uniform shrinkage of circular elastic nuclei with an initial radius  $R$  into holes of unit radius  $g(t^{(0)}) = (R - 1)e^i$ ,  $\Theta$  is the polar angle of the point  $t^{(m)}$  in the coordinate system associated with the center of the hole.

In addition to conditions (4), for each element of the boundary  $\Gamma$ , equilibrium conditions must be satisfied that lead to the second functional equation:

$$\phi(t^{(m)}) + t^{(m)} \overline{\phi'(t^{(m)})} + \overline{\psi(t^{(m)})} - \phi_m(t^{(m)}) - t^{(m)} \overline{\phi'_m(t^{(m)})} - \overline{\psi_m(t^{(m)})} = 0 \quad (5)$$

The system of equations (4) and (5) together with (3) makes it possible to determine  $\phi(z)$ ,  $\psi(z)$ ,  $\psi_m(z)$ , ( $m=0, 1, \dots, n=1$ ) from the given  $g(t)$  and the conditions at infinity.

The maximum tangential stresses  $\tau_{\max}$  and principal stresses  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  at the point  $z$  with  $\Omega$  are expressed in terms of the complex potentials  $\phi(z)$  and  $\psi(z)$ .

$$\tau_{\max} = [\bar{z}\phi'(z) + \psi'(z)], \quad (6)$$

$$\sigma_1 = \phi'(z) + \overline{\phi'(z)} + [\bar{z}\phi''(z) + \psi'(z)], \quad (7)$$

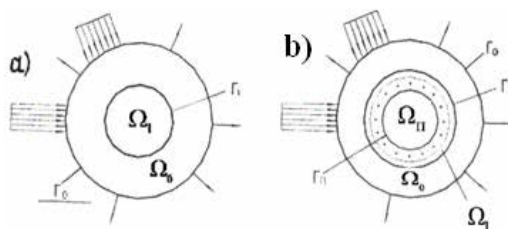
$$\sigma_2 = \phi'(z) + \overline{\phi'(z)} + [\bar{z}\phi_1''(z) + \psi_1'(z)], \quad (8)$$

An infinite isotropic elastic body with a regular ring of circular inclusions is considered as a model describing the stress distribution in the composite. Therefore, they can be thought of as elastic cores with equal effective characteristics. The elastic properties of the core and matrix materials differ from each other and are described by the modulus of elasticity and Poisson coefficient  $\nu$  or the Lyame constants  $\lambda$  and  $\mu$  which are related to  $E$  and  $\nu$  ratios.

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{and} \quad \mu = \frac{E}{2(1-\nu)}$$

In addition, an elastic constant is introduced:  $\chi = \frac{3-\nu}{1-\nu}$

The distribution of stresses in the composite caused by surges at the core boundaries is investigated. This simulates shrinkage phenomena occurring in both the matrix material and the core material. In any deformation, cracks do not occur between the cores and the matrix, and the centers of gravity of the cores coincide with the centers of gravity of the corresponding planes in the matrix (Figure 3).



**Figure 3. Design model of non-uniform material**  
**a – even boundary; b – case of smooth change of properties**

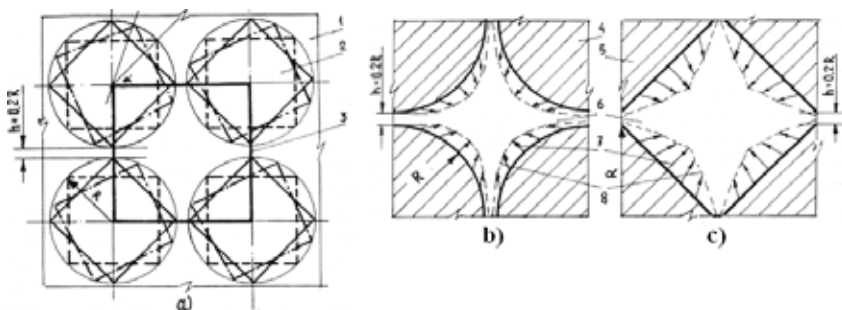
### 3. The mechanism of structure formation of the materials at the micro level

Previous studies have noted the effect of aggregate properties on concrete properties. At the same time, various models of concrete macrostructure were proposed, taking into account the volumetric concentration of aggregates, their shape, the ratio of the deformation and strength characteristics of the mortar part and aggregates. The analytical dependences of deformability and strength characteristics of concrete calculations, based on the rules or mixtures of conservation laws of additivity are proposed. As a rule, the calculated values and experimental results are far from satisfactory convergence.

In our studies, the analysis was carried out by the graphoanalytical method. When analyzing flat models of structural cells of concrete, the shape of the aggregates is taken in the form of a square. The reduced distance between the aggregates  $h$  for different orientations is accepted  $h=0,2R$ , where  $R$  – is the reduced radius (Figure 4a). Analysis was performed for a case where in the adhesion quantity,  $R_a$  the matrix material to the surface of the aggregates is less than its cohesive strength  $R_k$ ,  $R_a < R_k$ . Changing the shape of the aggregates changes the distribution of strains in the matrix material (Figure 4.b, c).

A comparison of the model with square-shaped aggregates was compared with the strain distribution in the model with disk-shaped aggregates. The analysis showed that when the shape of the aggregate changes, the character of the distribution of deformations of the hardened matrix material changes. The influence of the shape of the fillers on the strain gradients is especially noticeable when the orientation of the fillers changes are relative to each other (Figure 5). The violation of symmetry in the macrostruc-





**Figure 4. The effect of an aggregate shape on the distribution of shrinkage strain in the matrix**

a – geometric characteristics of the model of cellular concrete structure;

b – a model with placeholders in the form of a circle;

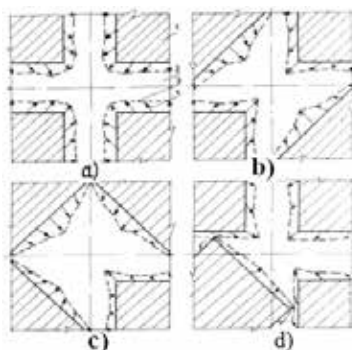
c – a model with square placeholders.

1 – matrix; 2 – placeholders; 3 – elementary cell structure;

4 – placeholders in the form of a circle; 5 – placeholders in the form of a square;

6 – matrix; 7 – direction of deformations; 8 – strain diagram

ture due to a change in the orientation of the fillers in the form of a square causes an asymmetric distribution of intrinsic deformations at the level of structural inhomogeneity.



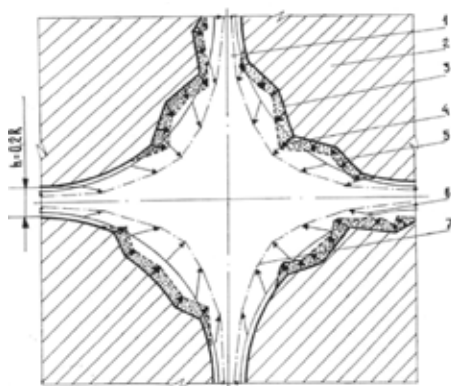
**Figure 5. The effect of filler orientation on shrinkage distribution**

a, b, c, d – ways of orienting placeholders

1 – placeholders; 2 – matrix; 3 – diagrams of deformations;

4 – direction of deformations

The distribution of intrinsic strains and their gradients in the hardening matrix material depends on the number of fillers that determines the distance between them, the shape of the fillers and their orientation relative to each other. The influences of the shape and relative orientation of the barriers are so significant that they can lead to a change in the nature of the distribution of technological strains in each structurally repeating cell. The structural cell includes a group of aggregates, in a certain way distributed in the matrix material. It is assumed that the characteristics of the cells are invariant that ensures the invariance of the properties, including the distribution of intrinsic deformations of the matrix material. Therefore, concrete, as a coarse heterogeneous composite, is represented as a set of structural cells that are identical in properties and parameters. In this regard, the adopted models of the macrostructure include the aggregates of the same shape, therefore, they were automatically transferred to the entire system. Our analysis showed that in the case of a change in the orientation of the aggregates, the shape of which differs from the circle for flat models, the nature of the distribution of intrinsic deformations in the hardening matrix material changes. This leads to individual characteristics of the formation of the macrostructure of concrete as a set of structural cells. The individuality of structural cells is also manifested in cases where the level of adhesion of the matrix material to the aggregates changes and in the case of a change in the surface topography of the aggregates. Figure 6 shows the integral and local deformations arising during the hardening of the matrix material for the case  $R_a < R_k$ .



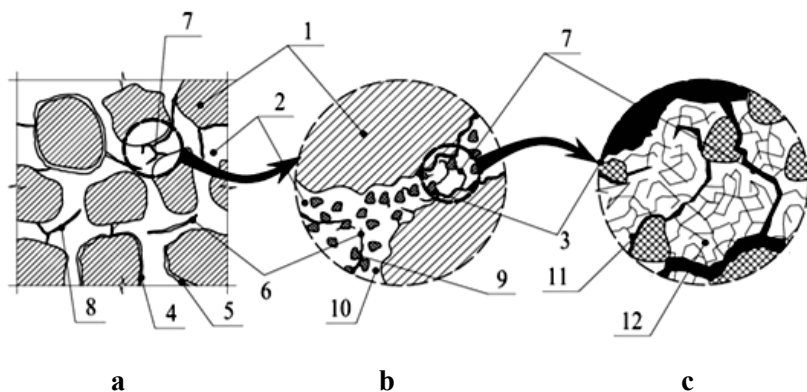
**Figure 6. The effect of the surface topography of aggregates on the nature of the distribution of shrinkage deformations**

- 1 – matrix; 2 – placeholders;
- 3 – relief surfaces of the fillers;
- 4 – direction of local deformations;
- 5 – diagrams of local deformations;
- 6 – direction of integral deformations;
- 7 – a plot of integral deformations

At the level of the structural cell, as well as at the level of the inner interface, the deformation gradients arise in magnitude and direction. Integral deformations are distributed fairly evenly compared to local deformations at the interface. A change in the surface topography of each aggregate causes a change in local deformations. Multidirectional deformations are also observed on the surface microroughnesses.

The analysis showed that at the macrostructure level there are adhesion cracks at the interface of the matrix material with large and small aggregates; starting from the crack of adhesion and developing into the mortar; cracks in the matrix that develop between the fillers.

In the general case, the concrete structure model includes internal interfaces formed as a result of the interaction of the mortar with a large aggregate (Figure 7), cement stone with fine aggregates (Figure 7b) and internal interfaces in the form of intercluster interfaces at the level of cement (Figure 7c).



**Figure 7. The model of concrete structure:**

**a – macrostructure; b – a level mortar part – a coarse aggregate;**

**c – level cement stone – fine aggregate.**

1 – coarse aggregate; 2 – solution part; 3 – a fine aggregate; 4 – adhesion cracks over the entire surface of the aggregate; 5 – adhesion cracks located on separate surface areas of the aggregates; 6 – cracks located between the fillers; 7 – cracks that close on the banks of other cracks; 8 – cracks that are not completed in their development; 9 – a modified surface layer on the inner interfaces and crack faces; 10 – a cement stone; 11 – cracks resulting from the interaction of small aggregates and a cement stone; 12 – structural blocks of a cement stone.

As studies have shown [5], the mechanism of formation of the macrostructure of concrete is determined by its geometric characteristics – the quantitative and qualitative composition of aggregates, and the level of interaction of the hardening matrix material with aggregates. The analysis of the structure of concrete as a coarse heterogeneous material and the mechanisms of structure formation at micro and macro levels allowed us to propose a model of the structure of concrete that includes aggregates, matrix material, a modified layer at the interface of the matrix and aggregates, pores and capillaries, as well as technological cracks and internal interfaces.

#### 4. Determination of stress state by methods of destruction mechanics

Analyzing projects [6, p. 77; 7, p. 123], it is possible to state questions concerning mixed deformation samples with breaches and defects are the subject of acute attention and intensive study in a modern on linear destruction mechanics. Specialists' interest in the mechanics field destruction mechanics is increasing towards tasks about inclined breaches and the breaches within the conditions of normal tensile tensioning and cross cut move attached simultaneously and relating to mixed forms stress in the destruction mechanics [8, p. 412].

There are three types of breaches in the destruction mechanics responding to the three types of stress: normal uplift breaches, cross cut and non linear move ones.

Marking the three types of breaches refers to line destruction mechanics where the composition of results had been got for the three stress types gives the true solution near the breach top for voluntary stress on the defected body:

$$\sigma_{ij}(r, \theta) = \sum_{n=1}^3 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_k^m f^{m,i,j}(\theta) r^{k/2-1} \quad (9)$$

$r, \theta$  – polar coordinates with the pole at the breach top.

Indicated stress types on the element of the construction with the breaches in line-elastic materials in ideal plastic bodies are studied quite well. However, tensioning deformation and moving divide near a defect top within the conditions of mixed breach stress in the non linear materials ( for hardens according to exponential material law for materials following exponential Norton's law of the theory of steady creeping) is not studied well. Probably, in a modern science literature there is no any investigation's

results of the effect of bloomed defect conservation on the direction of the breach extension within the conditions of mixed stress. There are various criteria of the direction of the breach spreading, for example, local criteria based on asymptotic tensioning divide at the breach top or a sharp gain. That's why asymptotic poles investigation of poles at the apex within the conditions of the mixed breach stress is an important in the modern non linear destruction mechanics and the mixed stress of the elements of defective construction is an object of constant attention of a scientific community and studied by many foreign mechanic recent years. Probably, first appeal to the investigation of mixed deformation forms was done in projects Si where tensioning and deformation poles was examined near the breach top that is under the influence of tensile and shift external forces ( so it was identified the mixed stress referring to the breaches of I and II types ). Si was the first who discovered the index of the stress (10):

$$M^p = \frac{2}{\pi} \arctg \left| \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\sigma_{\theta\theta}(r, \theta=0)}{\sigma_{r\theta}(r, \theta=0)} \right| \quad (10)$$

The index of stress combination  $M_p$  takes zero amount  $M_p=0$  for a fine cross cut sliding and the index is equal to one  $M_p=1$ , for usual uplift;  $0 < M_p < 1$  for all the intermediary types enclosed external forces.

There is a divide of tensioning, defomation and moving at the breach top in the material that follows an exponential law of the deformation theory of plastic properties for particular data of mixed stress index within the conditions of a flat deformation. Systematic calculation treatment of angle tensioning and deformation divide at the breach top in the material with the exponential determinative law for various index amounts of tensioning combination is indicated in [6, p. 77], where a system is designed and there are calculation results of elastoplastic rates of tensioning intensity in a complete diapason of mixed deformation forms from a right uplift to a full move and this allowed to study the form of the forthright oriented breach in a mathematical cut in a case of two-axial stress of the various intensity. On the ground of carried calculations it was arranged the character of the influence of mixed stress forms and plastic material features described by the index of deformation hardening.

In the project [9, p. 70] there is a numerical way of the determination of the full variety from proper amounts in non linear task to proper amounts

following from the problem of determination of tense deformed condition near the breach top within the conditions of mixed deformation for the material with exponential determinative equation ( the exponential law of a deformation theory of plasticity, the exponential law of a steady crawling). An author suggests the method that can be used for finding an intermediary asymptotic of tensioning poles in related (the crawling is a damage) task about the breach within the conditions of mixed stress in the material with exponential determinative equation of the set crawling theory.

It mentioned that the class of non linear tasks to proper accounts arising in non linear destruction mechanics is an important item due to the necessity of use multiscale, multilevel patterns [10, p. 1332; 11, p. 70] according to which at the breach top it is necessary to consider the complex of fields with a predominant activity of various asymptotic of tensioning poles and to undertake the splice procedure requires to know the whole variety of the own amounts and probably these problems are still not solved. In literature there are only two completed mathematically splice procedures: classical solving by Rice for the breach of an out-of-plane shearing [12, p. 191] and analytical solving for the breach of a finite length in an endless battenn.

To illustrate the local damage rate on various levels and the treatment of multiscale destruction character it is possible to use the scheme on figure 8 and first described in [13, p. 5]. It is mentioned in [14, p. 7] the conception development of mesomechanics requires more consistent way to solve the problems in cross-subject fields such as materiology and the mechanics of solid fields. Figure 8 shows the diagram of various big-and small-sized defects tensioning singularities near dislocations, micro- and macrodefects.

This diagram proves the necessity of applying the multilevel approach requiring the forming-up of hierarchic chain of fields with different characteristics of the tensioning pole near the breach top and from mathematical point of view it leads the determination of the whole variety of proper amounts and as a rule in non linear tasks to proper amounts had been got as a result of use the method of an expansion in analyzing tensioning, deformation and displacement poles near the breach top.

On the cause of [14, p. 7] let's show mathematical task organization following from the problem of deformed-tensely condition determination at the breach top within the conditions of mixed construction element deformation in the material with power equation:

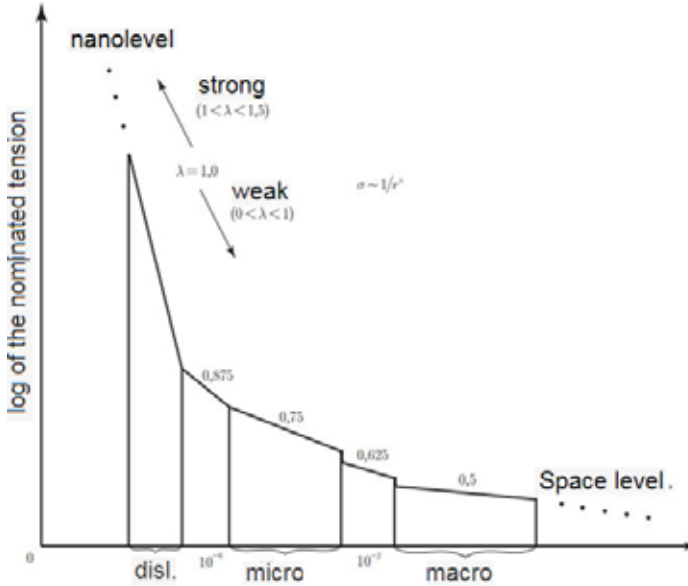


Figure 8. The orders of tensioning poles singularity near the breach top

$$\varepsilon_{ij} = 3B\sigma_e^{n-1}s_{ij} / 2, \quad (11)$$

where  $\varepsilon_{ij}$  – tensor component deformation,  $s_{ij}$  – components of tensor's deviator stress,  $\sigma_e = (3s_{ij}s_{ij} / 2)^{1/2}$  – the intensity of tangential stress,  $B$ ,  $n$  – mass constants. This task leads to the necessity of the investigation of balance equation (in the polar system coordinates with a pole at the breach top):

$$r\sigma_{rr,r} + \sigma_{r\theta,\theta} + \sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} = 0, \quad r\sigma_{r\theta,r} + \sigma_{\theta\theta,\theta} + 2\sigma_{r\theta} = 0 \quad (12)$$

And conditions of deformation :

$$2(r\varepsilon_{r\theta,\theta}), r = \varepsilon_{rr,\theta\theta} - r\varepsilon_{rr,r} + r(r\varepsilon_{\theta\theta}), rr \quad (13)$$

with determinative equations (9).

An author indicates that one of the most common methods of determination of the deformed-tensely condition at the breach top is the method of dissolution (contamination) to own functions according to asymptotic stage performance of stress function Eri  $\chi(r, \theta)$  near the breach top ( $r \rightarrow 0$ ) is determined as:

$$\chi(r, \theta) = Kr^{\lambda+1} f(\theta). \quad (14)$$

The components of tensor's stress near the breach top the form  $\sigma_{ij}(r, \theta) = r^{\lambda-1} \tilde{\sigma}_{ij}(r, \theta)$  or take:

$$\sigma_{rr} = r^{\lambda-1} [(\lambda+1)f + f''], \quad \sigma_{\theta\theta} = r^{\lambda-1} \lambda(\lambda+1)f, \quad \sigma_{r\theta} = -r^{\lambda-1} \lambda f'. \quad (15)$$

Asymptotic performance the intensity of the tangential stress within the conditions of flat deformed state at the breach top has the following form  $\sigma_e(r, \theta) = r^{\lambda-1} f_e(\theta)$ , where

$$f_e(\theta) = \sqrt{[f''(\theta) + (1 - \lambda^2)f(\theta)]^2 + 4\lambda^2[f'(\theta)]^2}.$$

Thus, because of the strength (11), (14), and (15) deformation tensor components with the flat deformed state condition near the breach top have the following structure:

$$\varepsilon_{rr}(r, \theta) = -\varepsilon_{\theta\theta}(r, \theta) = Br^{(\lambda-1)n} \tilde{\varepsilon}_{rr}(\theta), \quad \varepsilon_{r\theta}(r, \theta) = Br^{(\lambda-1)n} \tilde{\varepsilon}_{r\theta}(\theta), \quad (16)$$

where

$$\tilde{\varepsilon}_{rr}(\theta) = 3f_e^{n-1} [f''(\theta) + (1 - \lambda^2)f(\theta)] / 4, \quad \tilde{\varepsilon}_{r\theta}(\theta) = -3f_e^{n-1} \lambda f'(\theta) / 2.$$

Setting in the condition (16) of consistency (13) allows to get common non linear differential equations of the forth order as relating to  $f(\theta)$ , (17):

$$2[(\lambda-1)n+1] \tilde{\varepsilon}_{r\theta, \theta} = \tilde{\varepsilon}_{rr, \theta\theta} - (\lambda-1)n[(\lambda-1)n+2] \tilde{\varepsilon}_{rr} \quad (17)$$

Or in the function terms  $f(\theta)$ , (18):

$$\begin{aligned} & f_e^2 f^{(4)} \left\{ (n-1) \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right]^2 + f_e^2 \right\} + (n-1)(n-3) \times \\ & \times \left\{ \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] \left[ (1 - \lambda^2) f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] + \\ & + (n-1) f_e^2 \left\{ \left[ (1 - \lambda^2) f' + f''' \right]^2 + \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] (1 - \lambda^2) f'' + 4\lambda^2 (f'^2 + f f'') \right\} \\ & \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] + 2(n-1) f_e^2 \times \left\{ \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] \left[ (1 - \lambda^2) f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} \\ & \left[ (1 - \lambda^2) f' + f''' \right] + \square_1 (n-1) f_e^2 \left\{ \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] \left[ (1 - \lambda^2) f' + f''' \right] + 4\lambda^2 f f'' \right\} f' + \\ & + \square_1 f_e^4 f'' - \square_2 f_e^4 \left[ (1 - \lambda^2) f + f'' \right] + f_e^4 (1 - \lambda^2) f'' \square \square \end{aligned} \quad (18)$$

where the statements are established (19):

$$C_1 = 4\lambda [(\lambda-1)n+1], \quad C_2 = (\lambda-1)n[(\lambda-1)n+2]. \quad (19)$$



The solution to non linear equation (18) has to suit border conditions (21) emerging from the require of absence of pertaining surface efforts at6 the breach shores (20).

The condition of the absence of pertaining surface efforts at the breach shores:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta = \pm\pi) = 0, \quad \sigma_{r\theta}(r, \theta = \pm\pi) = 0. \quad (20)$$

Border conditions (21):

$$f(\theta = 0 \pm \pi) = 0, \quad f'(\theta = \pm\pi) = 0. \quad (21)$$

Thus, for the equation (18) the solution of which depends on border conditions (21) was formed non linear task for proper value: it is necessary to find proper value of  $\lambda$  responding non-trivial solutions (18), suiting border conditions (21). During the breach investigation of normal uplift and cross cut move for numerical equation solution (18) is used the conditions of symmetry or antisymmetry and the equation (18) that is integrated on the length  $[0, \pi]$  with initial conditions: for the breaches with normal uplift (22):

$$f(\theta = 0) = 1, \quad f'(\theta = 0) = 0, \quad f''(\theta = 0) = A_2, \quad f'''(\theta = 0) = 0. \quad (22)$$

And for the breaches of cross cut move (23):

$$f(\theta = 0) = 0, \quad f'(\theta = 0) = 1, \quad f''(\theta = 0) = 0, \quad f'''(\theta = 0) = A_3, \quad (23)$$

According to the work [9, p. 70] we describe the scheme of numeric solution of the whole variety of proper value in the non linear task for proper value arising from the problem of determination of the tense deformed condition at the breach top in the material with exponential equations in the conditions of mixed deformation within mixed deformation forms: from clear move to normal uplift.

The author states that in case of mixed deformation view of symmetry and antisymmetry can't be used and it is necessary to search the equation solution (18) on the length  $[\sim\pi, \pi]$ . In the conditions of mixed stress on numeric equation solution (18) the integrating length  $[\sim\pi, \pi]$  can be divided into two length  $[\sim\pi, 0]$  and  $[0, \pi]$  Koshi with initial conditions. First the equation (18) is integrated on the length  $[0, \pi]$  and border task goes to task Koshi with initial conditions (24).

$$\begin{aligned} f(\theta = 0) = 1, \quad f'(\theta = 0) = -(\lambda + 1) / \operatorname{tg}(M^p \pi / 2), \\ f''(\theta = 0) = A_2, \quad f'''(\theta = 0) = A_3. \end{aligned} \quad (24)$$

The value of first-order derivative originates from given form of mixed stress (the value of mixed stress term (10) giving the type of the stress is unknown). The unknown variables  $A_2$  and  $A_3$  are found in such a way in order to make border conditions on the top breach shore (25).

$$f(\theta = \pi) = 0, \quad f'(\theta = \pi) = 0. \quad (25)$$

After constants  $A_2$  and  $A_3$  determination the equation (18) is integrated on distance  $[\sim\pi, \theta]$  for that two-point border task for the equation (18) with border conditions (26).

$$\begin{aligned} f(\theta = -\pi) &= 0, \quad f'(\theta = -\pi) = 0, \\ f(\theta = 0) &= 1, \quad f'(\theta = 0) = -(\lambda + 1) / \operatorname{tg}(M^p \pi / 2). \end{aligned} \quad (26)$$

Is replaced Koshi task with initial conditions (27):

$$f(\theta = -\pi) = 0, \quad f'(\theta = -\pi) = 0, \quad f''(-\pi) = B_2, \quad f'''(\theta = -\pi) = -B_3. \quad (27)$$

The unknown constants  $B_2$  and  $B_3$  are chosen in such a way to follow element balance conditions that is placed on the half-line  $\theta=0$ . Balance equation of this element requires persistence tensor component of the 4 efforts on the half-line  $\theta=0$ , that leads to the function persistence (and as a result border conditions (26)). That's why two unknown constants  $B_2$  and  $B_3$ : are determined in such a way the resolution solving on the distance  $[\sim\pi, 0]$  was in accord with border conditions with  $\theta=0$ .

So the determination of the full variety of proper values of non linear task to proper values gives the opportunity to describe the structure of the top breach area within the conditions of mixed deformation and also to build up the configurations of the area of deformed material surrounding the breach top.

The author illustrates angle breakdown tensor component of efforts had been found as a result of the solution of a numerical problem according to the scheme described above for various terms of hardening index.

Following the scheme described in this work the opportunity to get proper values is opened, those ones can be used to build up multiscale, multilevel description of the destruction processes near the breach top. It is possible to conduct numerical analysis that enables to assess asymptotic of machinal poles at the breach top reinforced concrete at the distance balancing the shredding zone ( with the area of dispersed material).

The stages of the numerical finding of the whole variety of proper values in the non linear tasks for values originating from the problem of determi-

nation of the tense-deformed condition at the breach top in the material with the exponential determinative equation within the conditions of mixed deformation forms from clear move to normal separation are offered.

### 5. Conclusion

The use of the apparatus of the theory of analytical functions of a complex variable made it possible to obtain numerical results, characterizing the initial stage of material operation (the formation of diffuse damage) for any characteristics of materials, forms of inclusions and external influences.

The study of mechanisms of formation macrostructure concretes showed that the reasons of genesis and the development of discontinuity in hardening matrix material that degenerate in the internal surface of the process section or cracks are strain gradients.

Following the algorithm, it is possible to obtain eigenvalues for constructing a multiscale, multilevel description of fracture processes in the vicinity of the crack tip that lead to loosening of the material, crack growth, and structural failure.

### References:

1. Solomatov V.I., Dorofeyev V.S., Vyrovoy V.N., Sirenko A.V. (1991). *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy i konstruksii ponizhennoy materialoemkosti* [The composite building materials and constructions of lowered material consumption]. A builder, 144 p. (in Russian)
2. Dorofeyev V.S., Vyrovoy V.N. (1998). *Tehnologicheskaya povrezhdennost stroitelnykh materialov i konstruksiy* [Technological damage of building materials and structures]. Odessa: Gorod Masterov. (in Russian)
3. Vyrovoy V.N., Dorofeyev V.S. (2010). *Kompozitsionnye stroitel'nye materialy i konstruksii: Struktura, samoorganizatsiya, svoystva* [Composite building materials and structures: Structure, self-organization, properties]. Odessa, pod red. V.N. Vyrovogo. (in Russian)
4. Muskhelishvili N.I. (1971). *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti* [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow: Stroyizdat. (in Russian)
5. Dorofeyev V.S., Pushkar' N.V., Brednev A.M. (2019). *Deformatsii betona na beregakh tekhnologicheskikh treshchin pri znakoperemennom vozdeystvii sredi ekspluatatsii konstruksiy* [Concrete deformations on the banks of technological cracks at sign-alternating impact of the structure operation environment]. Current scientific research in the modern world, Journal-Pereyaslov-Khmelnicki, vol. 1(45) 4, 2, pp. 88–94.
6. Shlyannikov V.N., Kislova S.Yu. (2009). *Parametry smeshannykh form deformirovaniya dlya treshchiny v vide matematicheskogo razreza*. News of the

Saratov university [Parameters of mixed deformation forms for crack in the form of mathematical section]. T. 9, vol. 1, pp. 77–84.

7. Stepanova L.V., Elekina T.B. (2009). *Smeshannoe nagruzhenie (normal'nyy otryv i poperechnyy sdvig) elementa konstruktсии s treshchinoy v materiale s drobnolineynym zakonom polzuchestii* [Mixed loading (normal separation and transverse shear) of structural element with crack in material with fractional-linear law of creep]. Bull. of Samara State University, no 2(68), pp. 123–139.

8. B'yui Kh.D. (2011). *Mekhanika razrusheniya: Obratnye zadachi i resheniya* [Failure Mechanics: Reverse Challenges and Solutions]. Moscow, Fizmat-lit. (in Russian)

9. Adylina E.M. (2013). *Chislennyy metod postroeniya spektra sobstvennykh znacheniy nelineynoy zadachi, sleduyushchey iz odnoy problemy smeshannogo deformirovaniya plastiny s treshchinoy* [Numerical method of constructing a spectrum of eigenvalues of a nonlinear task following one problem of mixed deformation of a crack plate]. Bull. of Samara State University, no 6(107), pp. 70–83.

10. Stepanova L.V. (2009). *Analiz sobstvennykh znacheniy v zadache o treshchine v materiale so stepennym opredelyayushchim zakonom* [The analysis of own meanings in a task about a crack in a material with the degree identifying law]. Computational Mathematics and Mathematical Physics, no 8, pp. 1332–1347.

11. Adylina E.A., Stepanova L.V. (2012). *O postroenii mnogomasshtabnykh modeley neuprugogo razrusheniya* [About the formation of multiscale models of non-elastic damage]. Bull. of Samara State University, no 9(100), pp. 70–83.

12. Rice J.R. (1968). Mathematical analysis in mechanics of fracture. Fracture. Liebowitz. New York: Academic Press, vol. 2, pp. 191–311.

13. Si Dzh. (2008). *Mezomekhanika, ponyatie segmentatsii i mul'tiskeylingovyy podkhod: nano-mikro-makro* [Mesomechanical, the Concept of Segmentation and the Multi-Skeiling Approach: Nano-Micro-Macro]. Fizicheskaya mezomekhanika, T. 11, no 3, pp. 5–18.

14. Yakovleva E.M. (2016). *Kraevye zadachi o smeshannom nagruzhenii tel s razrezami s uchetom nakopleniya rasseyannykh povrezhdeniy v svyazannoy postanovke: Avtoreferat diss. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk* [Edge tasks on mixed loading of bodies with cuts taking into account accumulation of scattered damages in the related production]. Samara, pp. 7–9.

## TECHNOLOGY FOR SYNTHESIS OF GROUP DECISIONS IN VEHICLE SELECTION PROBLEM FOR MULTI-MODAL TRANSPORTATION

Igor Kovalenko<sup>1</sup>

Alyona Shved<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-57>

**Abstract.** Currently, multimodal transport is one of the priorities of the Ukrainian and European transport policies. The multimodal logistics is based on the effective management of technologically interconnected transportation of goods using more than two modes of transport under a single transportation contract. World practice of using multimodal logistics systems shows that today multimodal transportation is the most popular way to transport goods over medium and long distances. Based on effective combination of modes of cargo transportation, this approach can significantly reduce the cost of transportation, reduce the transportation time and organize the transportation of goods to anywhere in the world. However, using such kind of transportation is associated with various kinds of uncertainty and risks, caused by unevenness of material and traffic flows, using of various modes of vehicles, deterioration, obsolescence of transport infrastructure, etc. This gives rise to a wide range of tasks, solution of which is laid in the application of methods of decision support, forecasting, optimization of logistics systems and the construction of applied information technologies on this basis. At the same time, it is necessary to point out that one of the main problems of choice in logistics is vehicle selection problem for multimodal transportation, which should rely on their compliance with certain criteria, and take into account not only possible risks and advantages (gains), but also more a wide range of indicators. In this regard, for an effective problem-solving, a method for vehicle selection

---

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Professor at Department of Software Engineering,  
Petro Mohyla Black Sea National University, Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor at Department of Software Engineering,  
Petro Mohyla Black Sea National University, Ukraine

problem-solving for multi-modal transportation of goods under multicriteria based on the BOCR model has been proposed. This approach allows to take into account a number of qualitative indicators of transportation that determine its optimality and efficiency. Improving the quality and reliability of the results of examinations can be achieved through the organization of the expert group work. Thus, the problem of synthesis of group decisions arises. The methodology for aggregating individual expert assessments, which allows to synthesize group decisions in the context of various forms of ignorance, under the influence of which expert assessments are formed has been proposed. The proposed technique allows to take into account the form of experts' judgments presentation (crisp, fuzzy, interval judgments) in group decision-making process. In this case, the expert independently chooses the form for presenting his judgments when constructing pairwise comparisons matrices. At the same time, the expert may refuse to evaluate any objects, or select preferred groups of objects (construct the so-called truncated matrices of pairwise comparisons). To aggregate expert assessments, it is proposed to use a mechanism for expert evidence in the framework of notation of evidence theory or the theory of plausible and paradoxical reasoning (with a significant level of conflict). This allows to increase the reliability and quality of the obtained expert evidence. Examples of practical implementation of the proposed technology are given by solving the problem of multi-criteria selection of vehicles for multimodal transportation of grain cargoes using the BOCR model. The obtained results allow to conduct a deeper analysis of factors affecting the organization of the multimodal transportation process, and are designed to help improve the quality and efficiency of the decision-making processes in logistics systems.

### **1. Introduction**

Multimodal (combined) transport used different modes of transport for goods transportation in space and time, and occupy an important place in transport logistics. It should be noted that the results of such transportation largely depend on various types of uncertainty and risks. The main causes of which are the unevenness of material and traffic flows, using various types of vehicles, the conditions of transport corridors and nodes, features of transportation technologies, etc. This gives rise to a wide variety of tasks that could be solved by using decision support, forecasting, optimization

methods in logistics systems and the construction on this basis the applied information technologies. The analysis of existing models and methods of decision making and optimization of logistics systems showed that they are directed either towards the choice of decisions regarding risks, or towards the solution of a problem regarding gains [2, p. 34–50]. The discussion of the issue of approaches to complex accounting of both gains and risks is insufficiently reflected in modern literature. During recent years, many works of both domestic and foreign researchers have been devoted to different problems of logistics industry, in particular, mathematical models and methods for solving various optimization and decision-making problems. So, the problem of logistics system optimization in business based on game theory models has been considered in [2, p. 91–103; 3; 9, p. 150–159] are devoted to the analysis of the criteria for various vehicles selection in multimodal transportation [11, p. 238–250] is considered a probabilistic approach for managing uncertainty in logistics operations. A fairly extensive classifier of mathematical methods and models in logistics is presented in [12, p. 9].

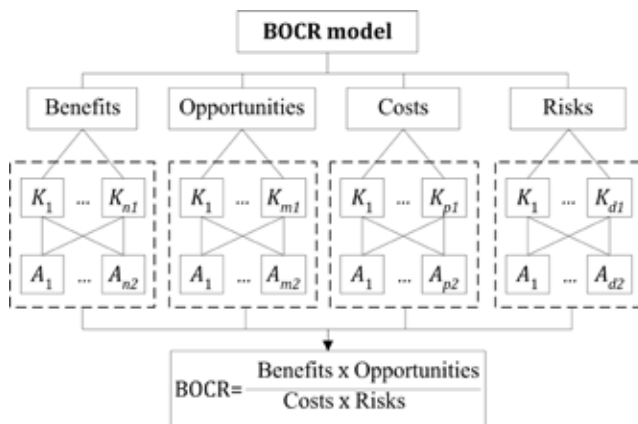
At the same time, it is necessary to point out the insufficiency of solution of choice problem under multicriteria environment, that taking into account not only the simultaneous consideration of risks and gains, but also a wider range of indicators. In this regard, to solve this problem, it seems more promising to use the BOCR model: B are Benefits, O are Opportunities, C are Costs, R are Risks, based on the analytic hierarchy process by T. Saaty (further – AHP) [13, p. 182].

The purpose of the work is to develop and define the basics of the technology for the synthesis of group decisions in vehicle selection problem for multimodal cargo transportation under multicriteriality and various types of ignorance, under the influence of which the expert data is formed.

### **2. Using the BOCR model for multi-criteria decision-making**

Any solution has advantages and disadvantages that must be carefully analyzed when making a choice. Some of them reflect well-defined aspects of the problem, others are less clear and may occur with some probability. Favorable aspects of the decision, which are expected with a high probability, are called benefits, while unfavorable aspects are called costs. Doubtful aspects of a decision can also be positive and negative. The positive aspects are the opportunities that can be obtained, and the

negative aspects are called the risks that may arise as a result of decisions made. Each of the four listed aspects of the BOCR model can be represented by a separate hierarchical structure and analyzed using the AHP technique (Figure 1).



**Figure 1. Structural representation of the BOCR model**

The basics of AHP methodology are associated with the following procedures: for each aspect, the pairwise comparisons matrices  $[B]$  are generated between for the criteria  $[K]$  and for all alternatives  $[A]$  according to each criterion using the appropriate scale of experts' measurement; the values of the eigenvector ( $C$ ) of this matrix are determined with their subsequent normalization and the final calculation of the weights of the priority vector is made. Next, the consistency check of the elements of matrix  $[B]$  is performed based on counting the Consistency Ratio ( $CR$ ). The  $CR$  should not exceed 10%.

Ultimately, for each of the considered alternatives, the BOCR coefficient is calculated as follows:

$$BOCR = \frac{\text{Benefits} \times \text{Opportunities}}{\text{Costs} \times \text{Risks}}. \quad (1)$$

By the magnitude of the BOCR coefficient, the final choice of the alternative is made or ranking of alternatives can be obtained.



### 3. Technology for synthesis of group decisions under imprecision

Let a group of experts  $E = \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$ , evaluating a set of alternatives  $A = \{A_i \mid i = \overline{1, m}\}$  by the pairwise comparison method, form a set of expert preferences profiles  $P = \{B_j \mid j = \overline{1, t}\}$ . The profile formed by the expert  $E_j$  reflects his preferences and presents his assessments in the form of a pairwise comparison matrix (PCM):

$$B_j = \begin{pmatrix} 1 & b_{12} & \dots & b_{1i} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & 1 & \dots & b_{2i} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & 1 & \dots & \dots & \dots \\ b_{i1} & b_{i2} & \dots & 1 & \dots & b_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mi} & \dots & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

where  $b_{ij} = 1 / b_{ji}$ ,  $\forall i, j = \overline{1, m}$ ;  $b_{ij}$  are expert estimates of objects (alternatives, criteria) formed using the appropriate scale of experts' measurement.

Let us consider a situation when an expert group is divided into subgroups  $E \subseteq \{Gr_1\}, \{Gr_2\}, \dots, \{Gr_p\}$ , ( $Gr_p \subseteq E$ ,  $\{Gr_p\} = \{E_1, \dots, E_r\}$ ,  $t \geq r \geq 1$ ) inside whose experts' assessments are presented in the framework of different scales of experts' measurements.

This approach allows to simulate the uncertainty associated with the process of obtaining expert information (expert assessments), by presenting imprecision associated with the form of presentation of expert assessments.

For example, there is a group of experts who prefer to express their judgments in fuzzy form; another group of experts prefers to express their judgments in crisp form; some experts decided not to evaluate all the alternatives given. The task is to synthesize a group solution allowing to take into account various forms of representing of experts' preferences.

In case when  $b_{ij}$  is expressed by crisp experts' estimates the procedure for finding eigenvectors of matrix in form as shown in Eq. 2 can be implemented by geometric mean method [14, p. 18-19]. Checking the consistency of the elements of the matrix (2) is carried out by counting the Consistency Ratio (CR) [14, p. 20]:

$$CR = CI / RI, \quad (3)$$

where  $m$  is a number of compared objects (order of matrix);  $CI$  is a consistency index,  $CI = (\lambda_{\max} - m) / (m - 1)$ ;  $\lambda_{\max}$  is a largest eigenvector of a matrix

of order  $m$ ,  $\lambda_{\max} = (\sum_{j=1}^{m_1} b_j) \cdot w_1 + (\sum_{j=1}^{m_2} b_j) \cdot w_2 + \dots + (\sum_{j=1}^{m_m} b_j) \cdot w_m$ ;  $RI$  is a random index for a matrix of order  $m$ .

The calculated eigenvector of pairwise comparison matrix is acceptable if  $CR \leq 0.10$ .

In case when  $b_{ij}$  is expressed by triangular fuzzy number (TFN)  $b_{ij} = (b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3)$ ,  $(b_{ij}^1 < b_{ij}^2 < b_{ij}^3)$ ,  $b_{ji} = \left[ \frac{1}{b_{ij}^3}, \frac{1}{b_{ij}^2}, \frac{1}{b_{ij}^1} \right]$ , or trapezoidal fuzzy number  $b_{ij} = (b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3, b_{ij}^4)$ ,  $(b_{ij}^1 < b_{ij}^2 < b_{ij}^3 < b_{ij}^4)$ ,  $b_{ji} = \left[ \frac{1}{b_{ij}^4}, \frac{1}{b_{ij}^3}, \frac{1}{b_{ij}^2}, \frac{1}{b_{ij}^1} \right]$ , the fuzzy pairwise comparison matrix in form as shown in Eq. 2 has been formed. [6, p. 56–81] proposes a wide range of approached for finding eigenvectors of matrix (2), which allow processing fuzzy pairwise comparison matrices with the elements are represented by trapezoidal and triangular fuzzy numbers.

[4, p. 1916; 8] propose the method for checking the consistency of the pairwise comparison matrix with triangular fuzzy elements:

$$CCI = \frac{2}{(m-1)(m-2)} \sum_{i < j} \left( \log \left( \frac{b_{ij}^1 + b_{ij}^2 + b_{ij}^3}{3} \right) - \log \left( \frac{w_i^1 + w_i^2 + w_i^3}{w_j^1 + w_j^2 + w_j^3} \right) \right)^2, \quad (4)$$

where  $b_{ij} = (b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3)$ ;  $w_j = (w_j^1, w_j^2, w_j^3)$  is a local priority vector;  $m$  is an order of matrix.

If  $CCI = 0$ , the matrix is considered absolutely consistent. [1; 4, p. 1916] suggests threshold values for matrices of order  $m = 3$   $CCI = 0.3147$ , of order  $m = 4$   $CCI = 0.3526$ , of order  $m > 4$   $CCI = 0.370$ .

In case when  $b_{ij}$  is represented by an interval number, then as a result of the pairwise comparisons procedure, an interval pairwise comparison matrix in form as shown in Eq. 2. will be obtained, where  $b_{ij} = [b_{ij}^1, b_{ij}^2]$ ,  $(b_{ij}^1 < b_{ij}^2 < b_{ij}^3 < 0)$ ,  $b_{ji} = \left[ \frac{1}{b_{ij}^2}, \frac{1}{b_{ij}^1} \right]$ ,  $b_{ii} = b_{ii}^1 = b_{ii}^2 = 1$ .

Interval PCM is consistent if the next valid area is nonempty [20, p. 480]:

$$S = \left\{ w = (w_1, w_2, \dots, w_m) \mid b_{ij}^1 \leq w_i / w_j \leq b_{ij}^2, \sum_{i=1}^m w_i = 1, w_i > 0 \right\}. \quad (5)$$

Interval PCM is consistent if its elements satisfy the inequality [21, p. 256]:

$$\max_k (b_{ik}^1, b_{kj}^1) \geq \min_k (b_{ik}^2, b_{kj}^2) \text{ for } \forall (i, j, k) = \overline{1, m}. \quad (6)$$

To obtain the values of the local priority vector from an interval PCM, currently widely used are: goal programming method (LGPPM) [22; p. 460], the lower and upper approximation method (LUAM) [19, p. 746], the two-stage logarithmic goal programming method TSLGP [20, p. 477–481], etc.

The main disadvantage of the considered methods based on pairwise comparison technique is that they can be used for a small number of compared objects (elements). Analyzing perhaps the most well-known method for solving multicriteria decision-making problem – the analytic hierarchy process method, it can be pointed out the following disadvantages:

- it is quite difficult to achieve a high level of consistency with an increase in the number of compared elements ( $n \geq 6$ );
- for large  $n$ , it is necessary to construct a large number of PCMs;
- the classical AHP does not operate with uncertain experts' judgements (an expert is not allowed to answer “I don't know” or “I'm not sure” during the PCMs construction).

To overcome these limitations, it can be used the modern methods for managing uncertainty that have appeared recently. Such approaches include the methods of the Dempster-Shafer Theory (DST, evidence theory) and the Dezert-Smarandache Theory (DSmT, theory of plausible and paradoxical reasoning) [7, p. 15–18].

For example, the DST/AHP method is a modification of the analytic hierarchy process method proposed by T. Saaty, which is based on elements of evidence theory. The main difference between the DST/AHP method and the AHP method is that the expert, according to each of the criteria, selects subgroups from the set of alternatives, and for each subgroup, in a given relation scale, assigns degrees of its superiority to other alternatives. Moreover, the expert himself determines for which alternatives or groups of alternatives he can express his preferences.

Formally, the procedure for finding the group decision under different forms of uncertainty based on pairwise comparison method can be represented in the form of the following successive stages:

1. Construction of a hierarchical structure of analyzed problem with several levels: goals – criteria – alternatives. In the framework of this stage, the set of analyzed objects (alternatives)  $A = \{A_i \mid i = \overline{1, m}\}$  and set of criteria  $K = \{K_l \mid l = \overline{1, n}\}$  (for multicriteria task) are formed.

2. Objects evaluation, construction of pairwise comparison matrices. As a result, pairwise comparisons matrices for the criteria and for the alternatives with respect to all given criteria are formed.

3. Calculation of priorities from pairwise comparison matrices, taking into account the form of experts' judgments. As a result of this procedure the local priority vectors of all given alternatives for all criteria and the local priority vector of all criteria will be formed. The choice of method depends on the form of presentation of expert assessments: crisp, fuzzy, interval experts' judgments.

4. Checking the consistency of experts' judgments.

5. Calculation of quantitative indicator of the quality of each alternative using expression:

$$U_i = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}, \quad (7)$$

where  $U_i$  is quantitative indicator of the quality of  $i$ -th alternative;  $w_j$  is a weight of  $j$ -th criterion;  $r_{ij}$  is a weight of  $i$ -th alternative for the  $j$ -th criterion.

As a result of this procedure, the vector  $W = \{W_j \mid j = \overline{1, t}\}$  will be formed, whose elements are the vectors of quantitative indicators of the quality of each alternative  $W_j = \{U_i^j \mid i = \overline{1, m}\}$  obtained on the basis of expert  $E_j$ , ( $j = \overline{1, t}$ ), judgments.

6. Aggregation of expert assessments in order to construction the collective decision (collective ranking) is carried out on the basis of the mechanism of their combination [17, p. 6–9; 18, p. 3–68; 15, p. 31–45]. To aggregate crisp expert assessments, it is recommended to use one of the proportional conflict redistribution rules [18, p. 3–68]; to aggregate interval expert assessments, it is recommended to use one of the evidence theory combination rules [15, p. 31–45]. The aggregation procedure is carried out by combining the obtained values  $W_j$  for all experts  $E = \{E_j \mid j = \overline{1, t}\}$ . The result of this procedure is a vector of quantitative indicators of the quality of each alternative  $W^{rez} = \{U_i^{rez} \mid i = \overline{1, m}\}$ , reflecting the opinion of expert group.

#### 4. Modeling by proposed technology for synthesis of group decisions

Let us consider an example of solving the vehicles selection problem in multi-modal transportation of bulk cargo (e.g. grain) using the BOCR model under multicriteriality, and uncertainty connected with form of expert preferences presentation (interval, fuzzy, crisp). To this end, let us consider the following notation:

1. Criteria for the “Benefits” aspect:  $K_1$  – delivery time;  $K_2$  – transportation costs;  $K_3$  – shipment frequency;  $K_4$  – transported cargo volume;

2. Criteria for the “Cost” aspect:  $K_5$  – financing of road infrastructures (upgrade and modernization);  $K_6$  – investments in transportation vehicles (wagons, motor vehicles, railed vehicles, watercraft, aircraft, etc.);  $K_7$  – investments in the production and technical base of transit corridors and nodes;

3. Criteria for the “Opportunities” aspect:  $K_8$  – bandwidth;  $K_9$  – the ability to deliver goods to any required place;  $K_{10}$  – tariff rates for transportation;  $K_{11}$  – weather conditions;

4. Criteria for the “Risks” aspect:  $K_{12}$  – risk of failure to fulfill cargo safety obligations;  $K_{13}$  – risk of failure to fulfill cargo delivery time obligations.

Let us consider next alternatives characterizing the modes of transportation of grain cargo:  $A_1$  – “Truck–Truck”;  $A_2$  – “Truck–Train”;  $A_3$  – “Truck–Ship.” Structurally, the problem is presented in Fig. 2.

Suppose that two experts are performed the examination. Let expert  $E_1$  evaluates the significance of one object of examination (alternative) over the other with a triangular fuzzy number  $b_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$  formed within the framework of a verbal scale expressing the degree of superiority of one element over another [10, p. 206], Table 1.

Table 1

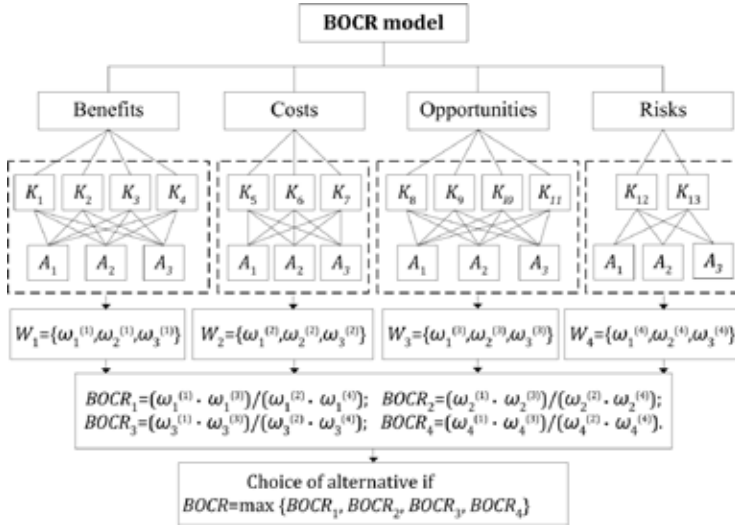
**Triangular Fuzzy Scale**

Verbal scale	Triangular fuzzy scale, $b_{ij}$	Triangular fuzzy scale, $b_{ji}$
Equal importance	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
Some superiority	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Weak superiority	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Strong superiority	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Very strong superiority	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Absolute superiority	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

For vector of local priorities calculating the Chang method was used [5, p. 352; 6, p. 69–72]. The main ideas of the method are as follows:

1. Calculate the sum of the elements of each row and normalize the resulting value

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^m b_{ij} \otimes \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} \right]^{-1}; \quad (8)$$



**Figure 2. The structure of vehicles selection problem using the BOCR method**

where:

$$\sum_{j=1}^m b_{ij} = \left( \sum_{j=1}^m l_{ij}; \sum_{j=1}^m m_{ij}; \sum_{j=1}^m u_{ij} \right); \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m u_{kj}}; \frac{1}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m m_{kj}}; \frac{1}{\sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m l_{kj}} \right);$$

$b_k \otimes b_p$  is – multiplication of triangular fuzzy numbers,  
 $b_k \otimes b_p = (l_k \times l_p, m_k \times m_p, u_k \times u_p);$ .

2. Calculate the degree of probability of  $\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j$  as follows:

$$V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j) = \begin{cases} 1, & m_j \geq m_i; \\ 0, & l_i \geq u_j; \\ \frac{u_i - l_j}{(u_i - m_i) + (m_j - l_j)}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

3. Calculate the degree of probability of  $\tilde{S}_i$  relative to other  $(n-1)$  fuzzy ratings

$$V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j | j = \overline{1, m}, i \neq j) = \min_{j=\overline{1, m}, i \neq j} V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j), \quad i = \overline{1, m} \quad (10)$$

4. Calculate the priority vector values:

$$\omega_i = \frac{V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j \mid j = \overline{1, m}, i \neq j)}{\sum_{k=1}^m V(\tilde{S}_i \geq \tilde{S}_j \mid j = \overline{1, m}, i \neq j)}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (11)$$

The results of pairwise comparisons for all four aspects based on fuzzy expert judgments are given in Tables 2 to 9.

Table 2

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Benefits” Aspect**

	Criterion $K_1$			Criterion $K_2$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(1,3/2,2)	(2,5/2,3)	(1, 1, 1)	(1/2,2/3,1)	(2/5,1/2,2/3)
$A_2$	(1/2,2/3,1)	(1, 1, 1)	(3/2,2,5/2)	(1,3/2,2)	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)
$A_3$	(1/3,2/5,1/2)	(2/5,1/2,2/3)	(1, 1, 1)	(3/2,2,5/2)	(2/3,1,2)	(1, 1, 1)
	Criterion $K_3$			Criterion $K_4$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)	(3/2,2,5/2)	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)	(2/7,1/3,2/5)
$A_2$	(2/3,1,2)	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)	(2,5/2,3)	(1, 1, 1)	(2/3,1,2)
$A_3$	(2/5,1/2,2/3)	(1/3,2/5,1/2)	(1, 1, 1)	(5/2,3,7/2)	(1/2,1,3/2)	(1, 1, 1)

Table 3

**Results of Pairwise Comparisons  
of a Set of Criteria for the “Benefits” Aspect**

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
$K_1$	(1, 1, 1)	(2/5, 1/2, 2/3)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)
$K_2$	(3/2, 2, 5/2)	(1, 1, 1)	(2, 5/2, 3)	(2, 5/2, 3)
$K_3$	(2/3, 1, 2)	(1/3, 2/5, 1/2)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)
$K_4$	(1/2, 2/3, 1)	(1/3, 2/5, 1/2)	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)

The local priority vectors of the alternatives:

- for the criterion  $K_1$ :  $r_1^1 = (0.61; 0.39; 0)$ ;
- for the criterion  $K_2$ :  $r_2^1 = (0.16; 0.44; 0.40)$ ;
- for the criterion  $K_3$ :  $r_3^1 = (0.51; 0.39; 0.10)$ ;
- for the criterion  $K_4$ :  $r_4^1 = (0.07; 0.44; 0.49)$ .

The local priority vector of the criteria:  $w_1^1 = (0.17; 0.64; 0.20; 0.00)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Benefits” aspect:  $U_1 = 0.31$ ;  $U_2 = 0.42$ ;  $U_3 = 0.27$ .

Table 4

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Costs” Aspect**

	Criterion $K_5$			Criterion $K_6$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(2,5/2,3)	(3/2,2,5/2)	(1, 1, 1)	(1/2,2/3,1)	(2/3,1,2)
$A_2$	(1/3,2/5,1/2)	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)	(1,3/2,2)	(1, 1, 1)	(1,3/2,2)
$A_3$	(2/5,1/2,2/3)	(2/3,1,2)	(1, 1, 1)	(1/2,1,3/2)	(1/2,2/3,1)	(1, 1, 1)
	Criterion $K_7$					
	$A_1$	$A_2$	$A_3$			
$A_1$	(1, 1, 1)	(1/2,2/3,1)	(1/3,2/5,1/2)			
$A_2$	(1,3/2,2)	(1, 1, 1)	(1/2,2/3,1)			
$A_3$	(2,5/2,3)	(1,3/2,2)	(1, 1, 1)			

Table 5

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Costs” Aspect**

	$K_5$	$K_6$	$K_7$
$K_5$	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)	(3/2, 2, 5/2)
$K_6$	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)
$K_7$	(2/5, 1/2, 2/3)	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)

The local priority vector of the alternatives:

- for the criterion  $K_5$ :  $r_5^l = (0.77; 0.04; 0.19)$ ;
- for the criterion  $K_6$ :  $r_6^l = (0.30; 0.43; 0.27)$ ;
- for the criterion  $K_7$ :  $r_7^l = (0.00; 0.32; 0.68)$ .

The local priority vectors of the criteria  $w^l = (0.56; 0.34; 0.10)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Costs” aspect:  $U_1 = 0.53$ ;  $U_2 = 0.20$ ;  $U_3 = 0.27$ .



Table 6

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Opportunities” Aspect**

	Criterion $K_8$			Criterion $K_9$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 1, 1)	(2, 5/2, 3)	(1, 3/2, 2)
$A_2$	(2/3, 1, 2)	(1, 1, 1)	(3/2, 2, 5/2)	(1/3, 2/5, 1/2)	(1, 1, 1)	(1/2, 1, 3/2)
$A_3$	(1/2, 2/3, 1)	(2/5, 1/2, 2/3)	(1, 1, 1)	(1/2, 2/3, 1)	(2/3, 1, 2)	(1, 1, 1)
	Criterion $K_{10}$			Criterion $K_{11}$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(1/2, 2/3, 1)	(1/3, 2/5, 1/2)	(1, 1, 1)	(2/5, 1/2, 2/3)	(1/2, 2/3, 1)
$A_2$	(1, 3/2, 2)	(1, 1, 1)	(2/5, 1/2, 2/3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)
$A_3$	(2, 5/2, 3)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)

Table 7

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Opportunities” Aspect**

	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$
$K_8$	(1, 1, 1)	(2/3, 1, 2)	(2/3, 1, 2)	(1/2, 1, 3/2)
$K_9$	(1/2, 1, 3/2)	(1, 1, 1)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 3/2, 2)
$K_{10}$	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)
$K_{11}$	(2/3, 1, 2)	(1/2, 2/3, 1)	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)

The local priority vectors of the alternatives:

- for the criterion  $K_8$ :  $r_8^1 = (0.39; 0.45; 0.16)$ ;
- for the criterion  $K_9$ :  $r_9^1 = (0.60; 0.12; 0.27)$ ;
- for the criterion  $K_{10}$ :  $r_{10}^1 = (0.00; 0.18; 0.82)$ ;
- for the criterion  $K_{11}$ :  $r_{11}^1 = (0.10; 0.56; 0.34)$ .

The local priority vector of the criteria  $w_3^1 = (0.25; 0.27; 0.27; 0.22)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Opportunities” aspect:  $U_1 = 0.28$ ;  $U_2 = 0.31$ ;  $U_3 = 0.41$ .

Table 8

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Risks” Aspect**

	Criterion $K_{12}$			Criterion $K_{13}$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	(1, 1, 1)	(3/2, 2, 5/2)	(1, 3/2, 2)	(1, 1, 1)	(1, 3/2, 2)	(2, 5/2, 3)
$A_2$	(2/5, 1/2, 2/3)	(1, 1, 1)	(2/3, 1, 2)	(1/2, 2/3, 1)	(1, 1, 1)	(1/2, 1, 3/2)
$A_3$	(1/2, 2/3, 1)	(1/2, 1, 3/2)	(1, 1, 1)	(1/3, 2/5, 1/2)	(2/3, 1, 2)	(1, 1, 1)

Table 9

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Risks” Aspect**

	$K_{12}$	$K_{13}$
$K_{12}$	(1, 1, 1)	(2/3, 1, 2)
$K_{13}$	(1/2, 1, 3/2)	(1, 1, 1)

The local priority vectors of the alternatives:

– for the criterion  $K_{12}$ :  $r_{12}^1 = (0.50; 0.25; 0.25)$ ;

– for the criterion  $K_{13}$ :  $r_{13}^1 = (0.59; 0.21; 0.20)$ .

The local priority vector of the criteria  $w_4^1 = (0.50; 0.50)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Risks” aspect:  $U_1=0.55$ ;  $U_2=0.23$ ;  $U_3=0.22$ .

As a result, form the priority vectors obtained on the basis of expert  $E_1$  judgements:

Benefits:  $W_1^1 = (0.31; 0.42; 0.27)$ . Costs:  $W_2^1 = (0.53; 0.20; 0.27)$ .

Opportunities:  $W_3^1 = (0.28; 0.31; 0.41)$ . Risks:  $W_4^1 = (0.55; 0.23; 0.22)$ .

Let expert  $E_2$  evaluates the significance of one object of examination (alternative) over the other in crisp form using the nine-point comparison scale: 1 – equal importance; 3 – moderate superiority; 5 – significant superiority; 7 – clear superiority; 9 – absolute domination; the values 2, 4, 6, 8 correspond to intermediate gradations [14, p. 53].

The geometric mean method was used for calculating local priorities:



– for the criterion  $K_3$ :  $r_3^2 = (0.57; 0.29; 0.14)$ ;

– for the criterion  $K_4$ :  $r_4^2 = (0.08; 0.33; 0.59)$ .

The local priority vector of the criteria  $w_1^2 = (0.21; 0.59; 0.14; 0.07)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Benefits” aspect:  $U_1 = 0.28$ ;  $U_2 = 0.42$ ;  $U_3 = 0.30$ .

Table 12

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Costs” Aspect**

	Criterion $K_5$			Criterion $K_6$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	5	4	1	1/3	1/2
$A_2$	1/5	1	2	3	1	3
$A_3$	1/4	1/2	1	2	1/3	1
	Criterion $K_7$					
	$A_1$	$A_2$	$A_3$			
$A_1$	1	1/3	1/5			
$A_2$	3	1	1/3			
$A_3$	5	3	1			

Table 13

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Costs” Aspect**

	$K_5$	$K_6$	$K_7$
$K_5$	1	3	4
$K_6$	1/3	1	3
$K_7$	1/4	1/3	1

The local priority vectors of the alternatives:

– for the criterion  $K_5$ :  $r_5^2 = (0.69; 0.19; 0.13)$ ;

– for the criterion  $K_6$ :  $r_6^2 = (0.16; 0.59; 0.25)$ ;

– for the criterion  $K_7$ :  $r_7^2 = (0.10; 0.26; 0.64)$ .

The local priority vector of the criteria  $w_2^2 = (0.61; 0.27; 0.12)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Costs”:  $U_1 = 0.48$ ;  $U_2 = 0.30$ ;  $U_3 = 0.22$ .

Table 14

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Opportunities” Aspect**

	Criterion $K_8$			Criterion $K_9$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	2	3	1	5	3
$A_2$	1/2	1	4	1/5	1	2
$A_3$	1/3	1/4	1	1/3	1/2	1
	Criterion $K_{10}$			Criterion $K_{11}$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	1/3	1/5	1	1/4	1/3
$A_2$	3	1	1/4	4	1	3
$A_3$	5	4	1	3	1/3	1

Table 15

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Opportunities” Aspect**

	$K_8$	$K_9$	$K_{10}$	$K_{11}$
$K_8$	1	1/2	1/2	2
$K_9$	2	1	2	3
$K_{10}$	2	1/2	1	3
$K_{11}$	1/2	1/3	1/3	1

The local priority vectors of the alternatives:

– for the criterion  $K_8$ :  $r_8^2 = (0.52; 0.36; 0.12)$ ;

– for the criterion  $K_9$ :  $r_9^2 = (0.66; 0.20; 0.14)$ ;

– for the criterion  $K_{10}$ :

– for the criterion  $K_{11}$ :  $r_{11}^2 = (0.12; 0.61; 0.27)$ .

The local priority vector of the criteria  $w_3^2 = (0.19; 0.41; 0.29; 0.11)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Opportunities” aspect:  $U_1 = 0.41$ ;  $U_2 = 0.28$ ;  $U_3 = 0.31$ .

Table 16

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Alternatives  
for the “Risks” Aspect**

	Criterion $K_{12}$			Criterion $K_{13}$		
	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_1$	$A_2$	$A_3$
$A_1$	1	4	3	1	3	5
$A_2$	1/4	1	1/2	1/3	1	2
$A_3$	1/3	2	1	1/5	1/2	1

Table 17

**Results of Pairwise Comparisons of a Set of Criteria  
for the “Risks” Aspect**

	$K_{12}$	$K_{13}$
$K_{12}$	1	1/2
$K_{13}$	2	1

The local priority vectors of the alternatives:

– for the criterion  $K_{12}$ :  $r_{12}^2 = (0.63; 0.14; 0.24)$ ;

– for the criterion  $K_{13}$ :  $r_{13}^2 = (0.65; 0.23; 0.12)$ .

The local priority vector of the criteria:  $w_4^2 = (0.33; 0.67)$ .

Let us calculate a quantitative indicator of the quality of each alternative for the “Risks” aspect:  $U_1 = 0.64$ ;  $U_2 = 0.20$ ;  $U_3 = 0.16$ .

As a result, form the priority vectors obtained on the basis of expert  $E_2$  judgments:

Benefits:  $W_1^2 = (0.28; 0.42; 0.30)$ . Costs:  $W_2^2 = (0.48; 0.30; 0.22)$ .

Opportunities:  $W_3^2 = (0.41; 0.28; 0.31)$ . Risks:  $W_4^2 = (0.64; 0.20; 0.16)$ .

For synthesis of group decisions use the operation of combining experts' judgments (evidence):

“Benefits” aspect:

Expert 1:  $m_1(A_1)=0.31$ ;  $m_1(A_2)=0.42$ ;  $m_1(A_3)=0.27$ .

Expert 2:  $m_2(A_1)=0.28$ ;  $m_2(A_2)=0.42$ ;  $m_2(A_3)=0.30$ .

“Costs” aspect:

Expert 1:  $m_1(A_1)=0.53$ ;  $m_1(A_2)=0.20$ ;  $m_1(A_3)=0.27$ .

Expert 2:  $m_2(A_1)=0.48$ ;  $m_2(A_2)=0.30$ ;  $m_2(A_3)=0.22$ .

“Opportunities” aspect:

Expert 1:  $m_1(A_1)=0.28$ ;  $m_1(A_2)=0.31$ ;  $m_1(A_3)=0.41$ .

Expert 2:  $m_2(A_1)=0.41$ ;  $m_2(A_2)=0.28$ ;  $m_2(A_3)=0.31$ .

“Risks” aspect:

Expert 1:  $m_1(A_1)=0.55$ ;  $m_1(A_2)=0.23$ ;  $m_1(A_3)=0.22$ .

Expert 2:  $m_2(A_1)=0.64$ ;  $m_2(A_2)=0.20$ ;  $m_2(A_3)=0.16$ .

The level of conflict is calculated as follows [17, p. 6]

$$k_{12} = \sum_{j=1}^3 m_1(A_j) \sum_{i=1, i \neq j}^3 m_2(A_i). \quad (13)$$

Level of conflict for example was:

“Benefits” aspect:  $k_{12} = 0.66$ . “Costs” aspect:  $k_{12} = 0.63$ .

“Opportunities” aspect:  $k_{12}=0.67$ . “Risks” aspect:  $k_{12}=0.57$ .

Taking into account a rather high level of conflict, the PCR5 rule of combination was used to aggregate experts’ judgments. This technique allows to redistribute conflicting basic belief assignments to the subsets involved in local conflicts [18, p. 36]. Let’s  $m_1(\cdot)$  and  $m_2(\cdot)$  be two independent basic belief assignment (*bba*’s), then the PCR5 rule of combination for two sources of evidence is defined as follows:

$$m_{PCR5}(C) = m_{12}(C) \sum_{\substack{Y \in G^A \setminus \{X\} \\ X \cap Y = \emptyset}} \left[ \frac{m_1(X)^2 \cdot m_2(Y)}{m_1(X) + m_1(Y)} + \frac{m_2(X)^2 \cdot m_1(Y)}{m_2(X) + m_2(Y)} \right], \quad (14)$$

where  $m_{12}(C)$  is combined basic belief assignment for a subset  $C = X \cap Y$ , calculated based on combination rules reflecting the conjunctive consensus;  $G^A = 2^A$  in DST framework, or  $G^A = D^A$  in DSMT framework.

The power set  $2A$  is the set of all possible combinations of elements built from elements of  $A$  with  $\cup$  [16; 17, p. 5]. The hyper-power set (Dedekind’s lattice)  $D^A$  is defined as the set of all possible combinations of elements built from elements of  $A$  with  $\cap$  and  $\cup$  [17, p. 13–14].

The resulting combined belief probability assignments in accordance with PCR5 rule:

“Benefits” aspect:

$m_{12}(A_1)=0.28$ ;  $m_{12}(A_2)=0.46$ ;  $m_{12}(A_3)=0.26$ .

“Costs” aspect:

$m_{12}(A_1)=0.59$ ;  $m_{12}(A_2)=0.21$ ;  $m_{12}(A_3)=0.20$ .

“Opportunities” aspect:

$$m_{12}(A_1)=0.35; m_{12}(A_2)=0.28; m_{12}(A_3)=0.37.$$

“Risks” aspect:

$$m_{12}(A_1)=0.71; m_{12}(A_2)=0.16; m_{12}(A_3)=0.13.$$

Calculated BOCR values shown in Table 18.

Table 18

**BOCR Values**

Alternatives	$A_1$	$A_2$	$A_3$	Ranking
Benefits	0.28	0.46	0.26	$A_2 \succ A_1 \succ A_3$
Costs	0.59	0.21	0.20	$A_1 \succ A_2 \succ A_3$
Benefits / Costs	0.47	2.19	1.30	$A_2 \succ A_3 \succ A_1$
Opportunities	0.35	0.28	0.37	$A_3 \succ A_1 \succ A_2$
Risks	0.71	0.16	0.13	$A_1 \succ A_2 \succ A_3$
Opportunities / Risks	0.49	1.75	2.85	$A_3 \succ A_2 \succ A_1$
Benefits / (Costs $\times$ Risks)	0.67	13.69	10.00	$A_2 \succ A_3 \succ A_1$
BOCR	0.23	3.83	3.70	$A_2 \succ A_3 \succ A_1$

From the results listed in Table 18 it can be seen that, taking into account the obtained values of the considered transportation aspects for this example,  $A_2$  is the best choice (alternative), which corresponds to the multimodal transportation “Truck–Train”.

## 5. Conclusions

The methodology for solving the vehicles selection problem in multimodal transportation under multicriteriality, and uncertainty has been proposed in this paper. This technique is based on the BOCR method, and takes into account a number of qualitative indicators that determine the optimality and efficiency of cargo transportation.

To aggregate individual expert assessments, a procedure has been proposed that allows to synthesize a group decisions taking into account



various forms of experts' preferences presentation (interval, fuzzy, crisp judgments). This approach allows to model various forms of "ignorance" (uncertainty, inconsistency, incompleteness, fuzziness, etc.) under the influence of which experts' judgments are formed, and not to impose strict restrictions on the form of their presentation.

### Список литературы:

1. Aguarón J. The geometric consistency index: Approximated thresholds / J. Aguarón, J. M. Moreno-Jiménez // *European Journal of Operational Research*. – 2003. – Vol. 147. – No. 1. – Pp. 137–145. doi:10.1016/S0377-2217(02)00255-2
2. Айбазова С.Х. Оптимизация системы логистики в бизнесе на основе теоретико-игровой модели: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / С.Х. Айбазова – М. : Финансовый университет при Правительстве РФ, 2014. – 154 с.
3. Алесинская Т.В. Основы логистики. Функциональные области логистического управления / Т.В. Алесинская – Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2010. – 116 с.
4. Bulut E. Use of consistency index, expert prioritization and direct numerical inputs for generic fuzzy-AHP modeling: a process model for shipping asset management / E. Bulut, O. Duru, T. Keçeci, S. Yoshida // *Expert Systems with Applications*. – 2012. – Vol. 39. – No. 2. – Pp. 1911–1923. doi:10.1016/j.eswa.2011.08.056
5. Chang D.Y. Extent analysis and synthetic decision, optimization techniques and applications / D.Y. Chang // *World Scientific*. – 1992. – Vol. 1. – P. 352.
6. Demirel T. Fuzzy Analytic Hierarchy Process and its application / T. Demirel, N. Ç. Demirel, C. Kahraman – In: C. Kahraman (eds) *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making*. Springer Optimization and Its Applications, vol. 16. – Boston : Springer, 2008. – Pp. 53–83.
7. Dempster A.P. Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping / A. P. Dempster // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1967. – Vol. 38. – No. 2. – Pp. 325–339.
8. Dopazo E. A parametric model for determining consensus priority vectors from fuzzy comparison matrices / E. Dopazo, K. Lui, S. Chouinard, J. Guisse // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2013. – Vol. 246. – Pp. 49–61. doi:10.1016/j.fss.2013.07.022
9. Гончарук С.М. Методологические основы проектирования этапного развития облика и мощности мультимодальной транспортной сети / С.М. Гончарук – Хабаровск : ДВГУПС, 2012. – 227 с.
10. Kulak O. Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process / O. Kulak, C. Kahraman // *Information Sciences*. – 2005. – Vol. 170. – Pp. 191–210. doi: 10.1016/j.ins.2004.02.021
11. Никифоров В.С. Мультимодальные перевозки и транспортная логистика / В.С. Никифоров – М. : ТрансЛит, 2007. – 272 с.
12. Плоткин Б.К. Экономико-математические методы и модели в логистике / Б.К. Плоткин – СПб. : СПбГУЭФ, 2010. – 96 с.

13. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Т. Саати; под. ред. А.В. Андрейчиков, О.М. Андрейчикова. – М. : ЛКИ, 2008. – 360 с.
14. Saaty T. The Analytic Hierarchy Process: panning, priority setting, resource allocation. Front cover / T. Saaty – New York : McGraw Hill, 1980. – 287 p.
15. Sentz K. Combination of evidence in Dempster-Shafer theory / K. Sentz, S. Ferson. – Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2002. – 94 p.
16. Shafer G. A mathematical theory of evidence / G. Shafer. – Princeton : Princeton University Press, 1976. – 297 p.
17. Smarandache F. Advances and applications of DSmtT for information fusion (collected works) 1 / F. Smarandache, J. Dezert. – Rehoboth : American Research Press, 2004. – 438 p.
18. Smarandache F. Advances and applications of DSmtT for information fusion (collected works) 2 1 / F. Smarandache, J. Dezert. – Rehoboth : American Research Press, 2006. – 461 p.
19. Sugihara K. Interval priorities in AHP by interval regression analysis / K. Sugihara, H. Ishii, H. Tanaka // *European Journal of Operational Research*. – 2004. – Vol. 158. – No. 3. – Pp. 745–754. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00418-1
20. Wang Y.M. A two-stage logarithmic goal programming method for generating weights from interval comparison matrices / Y.M. Wang, J.B. Yang, D.L. Xu // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2005a. – Vol. 152. – Pp. 475–498. doi:10.1016/j.fss.2004.10.020
21. Wang Y.M. Interval weight generation approaches based on consistency test and interval comparison matrices / Y.M. Wang, J.B. Yang, D.L. Xu // *Applied Mathematics and Computation*. – 2005b. – Vol. 167. – Pp. 252–273. doi:10.1016/j.amc.2004.06.080
22. Wang Y.M. A goal programming method for obtaining interval weights from an interval comparison matrix / Y.M. Wang, T.M.S. Elhag // *European Journal of Operational Research*. – 2007. – Vol. 177. – Pp. 458–471. doi:10.1016/j.ejor.2005.10.066

### References:

1. Aguarón J., Moreno-Jiménez J.M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research*, vol. 147, no. 1, pp. 137–145. doi: 10.1016/S0377-2217(02)00255-2
2. Aybazova S.Kh. (2014). Optimizatsiya sistemy logistiki v biznese na osnove teoretiko-igrovoy modeli [Optimization of a logistics system in business based on a game-theoretic model] (PhD Thesis). Moscow: Finansovyy universitet pri Pravitel'stve RF. (in Russian)
3. Alesinskaya T.V. (2010). *Osnovy logistiki. Funktsional'nye oblasti logi-sticheskogo upravleniya* [Basics of logistics. Functional areas of logistics management. Taganrog: TTI YuFU. (in Russian)
4. Bulut E., Duru O., Keçeci T., Yoshida S. (2012). Use of consistency index, expert prioritization and direct numerical inputs for generic fuzzy-AHP modeling: a process model for shipping asset management. *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 2, pp. 1911–1923. doi: 10.1016/j.eswa.2011.08.056
5. Chang D.Y. (1992). Extent analysis and synthetic decision, optimization techniques and applications. *World Scientific*, vol. 1, p. 352.

6. Demirel T., Demirel N.Ç., Kahraman C. (2008). Fuzzy Analytic Hierarchy Process and its application. In: C. Kahraman (eds) *Fuzzy Multi-Criteria Decision Making. Springer Optimization and Its Applications*, vol. 16. Boston: Springer, pp. 53–83.
7. Dempster A.P. (1967). Upper and lower probabilities induced by a multi-valued mapping. *Annals of Mathematical Statistics*, vol. 38, no. 2, pp. 325–339.
8. Dopazo E., Lui K., Chouinard S., Guisse J. (2013). A parametric model for determining consensus priority vectors from fuzzy comparison matrices. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 246, pp. 49–61. doi: 10.1016/j.fss.2013.07.022
9. Goncharuk S.M. (2012). *Metodologicheskie osnovy proektirovaniya etapnogo razvitiya oblika i moshchnosti mul'timodal'noy transportnoy seti* [Methodological aspects for designing the staged development of the appearance and power of a multimodal transport network]. Khabarovsk: DVGUPS. (in Russian)
10. Kulak O., Kahraman C. (2005). Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process. *Information Sciences*, vol. 170, pp. 191–210. doi: 10.1016/j.ins.2004.02.021
11. Nikiforov V.S. (2010). *Mul'timodal'nye perevozki i transportnaya logistika* [Multimodal transport and transport logistics]. Moscow: TransLit. (in Russian)
12. Plotkin B.K. (2010). *Ekonomiko-matematicheskie metody i modeli v logistike* [Economic and mathematical methods and models in logistics]. St. Petersburg: SpbGUEF. (in Russian)
13. Saati T. (2008). *Prinyatie resheniy pri zavisimostyakh i obratnykh svyazyakh: Analiticheskie seti* [Decision making under dependencies and feedbacks: Analytic networks]. In A.V. Andreychikov, O.M. Andreychikova (eds). Moscow: LKI. (in Russian)
14. Saaty T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: planning, priority setting, resource allocation. Front cover*. New York: McGraw Hill.
15. Sentz K., Ferson S. (2002). *Combination of evidence in Dempster-Shafer theory*. Albuquerque: Sandia National Laboratories.
16. Shafer G. (1976). *A mathematical theory of evidence*. Princeton: Princeton University Press.
17. Smarandache F., Dezert J. (2004). *Advances and applications of DSmt for information fusion (collected works)*, 1. Rehoboth: American Research Press.
18. Smarandache F., Dezert J. (2006). *Advances and applications of DSmt for information fusion (collected works)*, 2. Rehoboth: American Research Press.
19. Sugihara K., Ishii H., Tanaka H. (2004). Interval priorities in AHP by interval regression analysis. *European Journal of Operational Research*, vol. 158, no. 3, pp. 745–754. doi: 10.1016/S0377-2217(03)00418-1
20. Wang Y.M., Yang J.B., Xu D.L. (2005a). A two-stage logarithmic goal programming method for generating weights from interval comparison matrices. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 152, pp. 475–498. doi: 10.1016/j.fss.2004.10.020
21. Wang Y.M., Yang J.B., Xu D.L. (2005b). Interval weight generation approaches based on consistency test and interval comparison matrices. *Applied Mathematics and Computation*, vol. 167, pp. 252–273. doi: 10.1016/j.amc.2004.06.080
22. Wang Y.M., Elhag T.M.S. (2007). A goal programming method for obtaining interval weights from an interval comparison matrix. *European Journal of Operational Research*, vol. 177, pp. 458–471. doi: 10.1016/j.ejor.2005.10.066

## MATHEMATICAL MODEL OF THE HEAT TRANSFER PROCESS IN A RIBBED PIPE OF SPECIAL CONSTRUCTION

Serhii Kostyk<sup>1</sup>

Vladyslav Shybetskyy<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-58>

**Abstract.** One of the types of intensification of heat transfer in heat exchange equipment is the installation of ribs for heat exchange elements. The use of such developed surfaces allows to improve the parameters of heat transfer due to the turbulence of flows and significantly increase the specific heat transfer surface. This study is devoted to the development of a mathematical model of the process of heat transfer of a finned surface of a specific design. The effectiveness of the proposed rib design is confirmed by both experimental research and computer simulation in ANSYS. The mathematical models obtained adequately describe the heat transfer, both under forced and free convection. The proposed models take into account both the convective component of heat transfer and thermal radiation, which allows it to be used for selection, which operates over a wide range of temperatures. The thermal resistance of the heat exchange element takes into account the coefficient of thermal conductivity of the material and the geometric shape of the wall. Particular attention should be paid to the study of the effect of temperature deformations on the wall of the ribbed element. This is especially important in cases of large differences in coolant temperatures in the tube and between the tubes spaces, since the heat exchangers are subject to linear and volumetric deformation. In such situations, the heat exchanger element may lose its elastic equilibrium shape, which may lead to residual deformation and, in some cases, the destruction of structural members. Installation of ribs on heat-exchange elements must be carried out taking into account both the possible temperature deformations and in terms of structural features.

---

<sup>1</sup> Candidate of Technical Sciences PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department Biotechnics and Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Technical Sciences PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department Biotechnics and Engineering, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

All mathematical dependencies can be used in the calculations of heat exchange equipment with fins for predicting the parameters of the heat parameters and estimating the value of the heat flux. The reliability of the results is ensured by the correctness, completeness and adequacy of the physical assumptions in the formulation of the problems, the use of modern tools of mathematical and computer simulation, as well as the methods of statistical processing of experimental data, and is confirmed by the satisfactory conformity in comparing the results of the calculations with the obtained experiments.

### 1. Introduction

Modern biotechnological productions focused on the production of biologically active substances (BAS) with the use of biological agents require highly efficient equipment. As biological agents (BA), microorganisms, animal and plant cells and cellular components (cell organelles) are usually used.

The development of pharmaceutical biotechnology is focused on the exploitation of BA with the aim of obtaining active pharmaceutical ingredients (API), which are used as active substances in the composition of finished medicines (drugs).

Today, heat exchange processes are present in almost all technological processes of drug production and play a rather important role. Therefore, the intensification of heat exchange processes, the improvement and development of appropriate equipment is quite an urgent task.

Among various heat exchanger equipment shell and tube heat exchangers occupy their specific place and this is due to the fact that for the intensification of the heat transfer process, it is quite easy to increase the heat exchange area by the use of special ribbing on the tubes of the shell and tube heat exchanger [1, p. 201].

In heat exchange processes, shell and tube heat exchangers are quite efficient and easy to manufacture, as many years of practice in the use of these devices have shown. The designs of shell and tube heat exchangers are constantly being improved, the materials from which they are made are changing, which leads to a constant increase in the technical and economic parameters of the equipment [2, p. 570].

Studying the mechanisms of heat exchange processes and improving the structural elements of heat exchange equipment in order to increase the efficiency is a pressing problem today.

The subject of the research is the process of heat transfer, which are realized in the shell and tube heat exchanger of a special design with special ribbing.

The purpose of the work is to build a mathematical model of the heat transfer process and to improve the structural elements of the heat exchange equipment in order to intensify the heat transfer process and to improve the technical and economic performance of the equipment.

The intensification of heat transfer processes is quite interesting and challenging. When designing and improving heat exchange equipment, it is necessary to pay attention to a large number of various factors that can affect the overall technical implementation and individual design decisions. The efficiency of heat transfer equipment depends most on the temperature gradient and the heat transfer area. Usually, we cannot change the temperature gradient due to an existing process, whereas the heat exchange area can be developed in various ways. We have proposed a ribbing design that will be further used in the study.

Since this construction is new, the following issues need to be studied in the applied and fundamental aspects:

- 1) Development of a mathematical model of the heat transfer process through the proposed rib design for forced convection;
- 2) Development of a mathematical model of the heat transfer process through the proposed rib design for natural convection;
- 3) Analysis of the influence of fining parameters on the value of heat flux.

## **2. Formulation of the problem of theoretical research**

The first stage in the development of a mathematical model of the system is the formulation of problems of theoretical research. Among the objectives of the theoretical study of the process of heat transfer through the ribbed tube of shell and tube heat exchanger of a special design were the following:

1. To propose a mathematical model for heat transfer through ribbing of a special design; the task is to solve the criterion equations that describe the transfer of thermal energy through the construction mentioned above;

This mathematical model is based mainly on the criterion equations describing the transfer of thermal energy through the ribbed surface.

2. Evaluation of the influence of process parameters on the amount of heat flow transmitted through the ribbed surface. To solve this problem, it is advisable to conduct a number of theoretical numerical experiments on the basis of the developed mathematical model.

In practice, it is convenient enough for these purposes to use the mathematical package MathCad, which makes it possible to automate a number of complex, often repetitive mathematical actions, to optimize iterative processes of graphical interpretations of functional dependencies.

3. Selection of optimal conditions for carrying out the process of heat transfer, based on the results of theoretical research. This task requires a comprehensive analytical approach to formulate conclusions on the entire volume of theoretical studies and is essentially the starting point for the practical implementation of the developed apparatus design.

### 3. Analysis of process features

One way to intensify heat transfer processes is to increase the heat transfer surface by using ribbing. The heating surface of the ribbed heat exchangers is made of tubes with transverse, longitudinal, wire, rod and other ribs.

The usage of finned heat exchange surfaces increases the heat exchanger's compactness, that is, the ratio of heat exchange area, to the volume it occupies. The use of ribbed heat exchangers makes sense when the heat transfer coefficient of one coolant is much less than the heat transfer coefficient of another coolant. Ribbing is usually performed on the side of a smaller coefficient of heat transfer [3, p. 415].

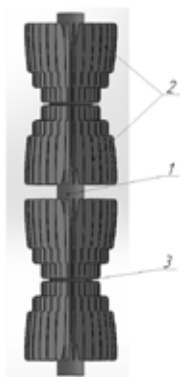
In Figure 1 the General view of the ribbed tube is shown.

In Figure 2 the cross-section of the ribbed tube with the proposed construction is shown.

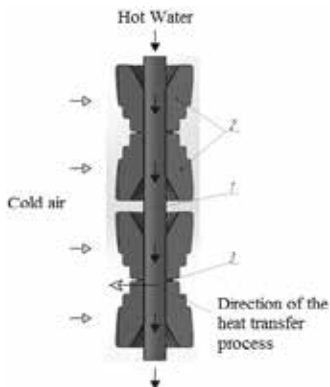
This ribbing works as follows. During the operation of the heat exchanger, the fluid-coolant contacts the inner surface of the heat exchanger tube 1, washing its inner surface, and gives off heat energy with a coefficient of heat transfer  $\alpha_1$  to the tube wall, which is made of a material with a high coefficient of thermal conductivity (copper, brass). In the wall of the tube 1 and the special rib section 2, heat transfer occurs due to the high thermal conductivity of the material. Further, thermal energy with a coefficient of heat transfer  $\alpha_2$  from the surface of the wall of the tube 1 with special ribs 2 is given to the cold gas coolant (air), which is washed in the longitudinal direction the tubular element [1, p. 230].

In this design, the heat transfer is as follows:

Hot coolant (water)  $\rightarrow$  tube wall  $\rightarrow$  gap between rib section and tube wall  $\rightarrow$  rib fin  $\rightarrow$  cold coolant (air)



**Figure 1 General view of the ribbed tube: 1 – tube, 2 – rib sections, 3 – fixing ring**



**Figure 2 Cross-section of the tube with ribbing: 1 – tube, 2 – rib sections, 3 – fixing ring**

In mathematical description of the process of heat transfer through this structure there are 4 thermal resistances, which affect the amount of heat flux transmitted through the fins design:

- thermal resistance of the tube wall;
- thermal resistance of the air gap;
- thermal resistance of ribbing;
- thermal resistance from the side of the washing air.

Therefore, when creating a mathematical model describing the process of heat transfer through a ribbed surface, it is necessary to take into account the influence of the above-mentioned thermal resistances on the heat flux.

The basis for the creation of this mathematical model are the following tasks:

- 1) Determination of the level of influence of technological gap on the amount of transmitted heat flow;
- 2) Finding the dependence of the heat flux value on the cold coolant (air) velocity washing the ribbing and on the temperature difference between hot and cold coolants;
- 3) Determination of the effect of the gap formed as a result of temperature deformations in the structural elements on the value of the transmitted heat flux.



#### 4. Analysis of theoretical bases of heat transfer process

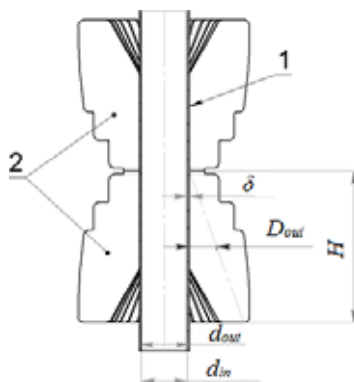
The increase in the heat transfer surface in the heat exchange equipment significantly intensifies the heat exchange process and, accordingly, increases the technical and economic performance of the equipment. A mathematical model of the process of heat transfer through the developed (ribbed) surface of heat exchange can be developed on the basis of a system of criteria equations by the methods of mathematical physics [4, p. 195].

Analysis of the theoretical foundations of heat transfer through the ribbed surface provides for the adoption of assumptions that in the future will develop a mathematical model and solve it for the particular case under consideration. At this point, it is necessary to describe the physical model of theoretical research as a functioning system, indicating the defining parameters of the system and their impact on it. Based on its features, it is possible to formulate geometric and physical conditions of uniqueness and set initial conditions [1, p. 220].

Geometric conditions of uniqueness. The system is a tube with special ribbing sections attached to it. The outer diameter of the pipe  $d_{out}$ , the inner diameter of the pipe  $d_{in}$ , the height of the rib section  $H$ , the average outer diameter of the rib section  $D_{out}$ , the thickness of the technological gap between the pipe and the rib section  $\delta$  (Figure 3). Since the technological gap  $\delta$  is rather small, it can be assumed that the heat flux section will have a tangential orientation, so it is convenient to choose a Cartesian coordinate system.

Physical conditions of uniqueness. The hot coolant (water) moves along the tube at the rate  $\omega$ , the heat flow  $Q$  is transmitted through the tube wall and the technological gap to the edges. Cold coolant (air) moves at speed  $W$ , flushing the fins. The thermal energy in the ribbing section is propagated by convective heat transfer and radiation from the rib surface.

Initial conditions. At the initial time  $\tau=0$  s, the fluids in the system are at rest (the velocities of the coolants are zero,  $\omega=0$  m/s,  $W=0$  m/s), there is no temperature gradient.



**Figure 3. Research system:**  
1 – tube of heat exchanger,  
2 – sections of special ribbing

The main process that takes place in the physical model is heat transfer. For a description of temperature distribution over the volume of the system commonly used grids method. This method allows you to determine the temperature at points of the system step by step, given the boundary conditions and laws of change of heat flow. This system can be considered with free and forced convection, which will determine the optimal mode of operation [5, p. 30].

### **5. Mathematical model of the heat transfer process for free convection**

Grasshoff's criterion can be found by the formula:

$$Gr = \frac{g \cdot s^3}{\nu B^2} \cdot \beta \cdot (t_1 - t_2). \quad (5.1)$$

Where  $\beta$  – coefficient of thermal expansion that is given by equation:

$$\beta = \frac{1}{273 + t_2}.$$

Rayleigh criterion can find the formula, where  $Pr$  – Prandtl number for air:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (5.2)$$

Nusselt criterion equation for free convection:

$$Nu = 0.112 \cdot \left( \frac{s \cdot Ra}{L} \right)^{0.534} \cdot \left( 1 - e^{-129 \cdot \frac{s}{L \cdot Ra}} \right)^{0.284}. \quad (5.3)$$

The heat transfer in this system with free convection is carried out by convective heat exchange between the ribbed surface and the cold coolant, and the radiation of heat from the ribs. Then the resulting heat transfer coefficient will have 2 components: the heat transfer coefficient for convective heat transfer and the heat transfer coefficient for radiation. Then the resulting heat transfer coefficient can be found by the formula:

$$\alpha = \alpha_{con} + \alpha_{rad}. \quad (5.4)$$

The coefficient of heat transfer in convective heat exchange can be found by the formula:

$$\alpha_{con} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{s}. \quad (5.5)$$

The coefficient of heat transfer during radiation can be found by the formula:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \frac{\left(\frac{273 + t_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{273 + t_2}{100}\right)^4}{t_1 - t_2}. \quad (5.6)$$

The coefficient  $\mu$  can be found by the formula [1, p. 211]:

$$\mu = \sqrt{\left(\frac{P \cdot \alpha}{F \cdot \lambda_m}\right)}. \quad (5.7)$$

The heat transfer parameter  $K$  can be found by the formula:

$$K = \lambda_m \cdot F \cdot \mu \cdot th(\mu \cdot L). \quad (5.8)$$

Where  $th(\mu \cdot L)$  is a hyperbolic tangent from the product  $\mu \cdot L$ .

The heat flow from hot coolant (water) to cold coolant (air) can be found by the formula:

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) \cdot L}{\frac{1}{\pi \cdot d_{in} \cdot \alpha_w} + \frac{\ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m} + \frac{\ln\left(\frac{d_{out} + \delta}{d_{out}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_a} + \frac{1}{K \cdot z}}. \quad (5.9)$$

Where  $z$  is the number of ribs in the section.

The coefficient of heat transfer through the entire construction can be found using the formula:

$$K_e = \frac{Q}{(t_1 - t_2) \cdot L}. \quad (5.10)$$

Equation (5.9) can be considered as a mathematical model of heat transfer with free convection for the system under consideration. It characterizes the amount of heat flow that is transmitted through the whole structure.

## 6. Mathematical model of heat transfer process for forced convection

Determining size can be found by the formula:

$$d_D = \frac{4 \cdot F}{P}. \quad (6.1)$$

Where  $F$  is the cross-sectional area of the intercostal space,  $P$  is the perimeter of the cross-section of the intercostal space.

Reynolds criterion can be found by the formula:

$$Re = \frac{W \cdot d_D}{\nu_a}. \quad (6.2)$$

Where  $W$  is the rate of cold coolant (air).

Nusselt's criterion can be found by the formula:

$$Nu = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43}. \quad (6.3)$$

Where  $Pr$  is the Prandtl criterion for air.

Since from the rib side heat transfer by radiation has virtually no effect on the amount of heat flow at high speeds of movement of the coolant, it can be neglected. Then the heat transfer coefficient for convective heat transfer can be found by the formula:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{d_D}. \quad (6.4)$$

The coefficient  $\mu$  can be found by the formula [1, p. 211]:

$$\mu = \sqrt{\left( \frac{P \cdot \alpha}{F \cdot \lambda_m} \right)}. \quad (6.5)$$

The heat transfer parameter  $K$  can be found by the formula:

$$K = \lambda_m \cdot F \cdot \mu \cdot th(\mu \cdot L). \quad (6.6)$$

Where  $th(\mu \cdot L)$  is a hyperbolic tangent from the product  $\mu \cdot L$ .

The heat flow from hot coolant (water) to cold coolant (air) can be found by the formula:

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) \cdot L}{\frac{1}{\pi \cdot d_{in} \cdot \alpha_w} + \frac{\ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m} + \frac{\ln\left(\frac{d_{out} + \delta}{d_{out}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_a} + \frac{1}{K \cdot z}}. \quad (6.7)$$

Where  $z$  is the number of ribs in the section.

The coefficient of heat transfer through the entire construction can be found using the formula:

$$K_e = \frac{Q}{(t_1 - t_2) \cdot L}. \quad (6.8)$$

Equation (6.7) can be considered as a mathematical model of heat transfer with forced convection for the system under consideration. It characterizes the amount of heat flow that is transmitted through the whole structure.

## **7. A mathematical model of the heat transfer process for a non-ribbed surface with free convection**

Grasshoff's criterion can be found by the formula:

$$Gr = \frac{g \cdot s^3}{\nu B^2} \cdot \beta \cdot (t_1 - t_2). \quad (7.1)$$

Where  $\beta$  – coefficient of thermal expansion that is given by equation:

$$\beta = \frac{1}{273 + t_2}.$$

Rayleigh criterion can find the formula, where  $Pr$  – Prandtl number for air:

$$Ra = Gr \cdot Pr. \quad (7.2)$$

Nusselt criterion equation for free convection:

$$Nu = 0.112 \cdot \left( \frac{s \cdot Ra}{L} \right)^{0.534} \cdot \left( 1 - e^{-129 \cdot \frac{s}{L \cdot Ra}} \right)^{0.284}. \quad (7.3)$$

The heat transfer in this system with free convection is carried out by convective heat exchange between the pipe surface and the cold coolant, and the radiation of heat from the pipe surface. Then the resulting heat transfer coefficient will have 2 components: the heat transfer coefficient for convective heat transfer and the heat transfer coefficient for radiation. Then the resulting heat transfer coefficient can be found by the formula:

$$\alpha = \alpha_{con} + \alpha_{rad}. \quad (7.4)$$

The coefficient of heat transfer in convective heat exchange can be found by the formula:

$$\alpha_{con} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{s}. \quad (7.5)$$

The coefficient of heat transfer during radiation can be found by the formula:

$$\alpha_{rad} = \varepsilon \cdot c_0 \cdot \frac{\left( \frac{273 + t_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_2}{100} \right)^4}{t_1 - t_2}. \quad (7.6)$$

The heat flow from hot coolant (water) to cold coolant (air) can be found by the formula:

$$Q = \frac{(t_1 - t_2) \cdot L}{\frac{1}{\pi \cdot d_m \cdot \alpha_w} + \frac{\ln \left( \frac{d_{out}}{d_{in}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_m} + \frac{1}{\pi \cdot d_{in} \cdot \alpha_{air}}}. \quad (7.7)$$

The coefficient of heat transfer through the entire construction can be found using the formula:

$$K_e = \frac{Q}{(t_1 - t_2) \cdot L}. \quad (7.8)$$

Equation (7.7) can be considered as a mathematical model of heat transfer for a non-finned surface with free convection for the system. It characterizes the heat flux that is transmitted through the whole structure.

## 8. Mathematical model of heat transfer process taking into account temperature deformations

Temperature deformation is a change in linear dimensions and body shape as its temperature changes. The coefficients of linear and volumetric temperature expansion are used to describe this phenomenon. They characterize the relative elongation of the linear dimensions (volume increase) of the medium with a temperature increase of 1°C.

Under the influence of temperature, the linear dimensions of the parts increase, which can affect the technological gap between the tube and the rib section  $\delta$  and, in turn, the magnitude of the heat flux transmitted through the whole structure [6, p.50].

Heat exchange tubes and fins are subjected to temperature deformation in the system. Since the fins are fixed to the support rings, which in turn are welded to the tube, the temperature deformation of the ribs will not affect the gap  $\delta$  as shown at Figure 4.

The initial clearance for this system is  $\delta_0 = 0.00014$  m (sliding landing).

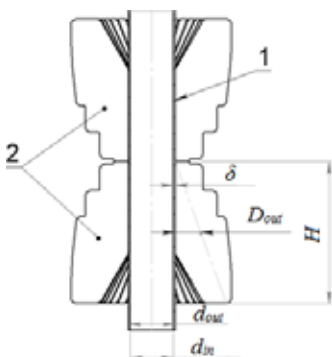
The temperature in the pipe wall changes according to the logarithmic law, then [1, p. 215]:

$$t(r) = \frac{\Delta T}{\ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right)} \cdot \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right). \quad (8.1)$$

Where  $d_{out}$  is the outer diameter of the tube,  $d_{in}$  is the inner diameter of the tube,  $\Delta T$  is the temperature difference.

The factor  $\varepsilon$  can be determined by the formula:

$$\varepsilon = \frac{2}{r_{out}^2 - r_{in}^2} \cdot \int_{r_{in}}^{r_{out}} \alpha_1 \cdot t(r) \cdot r_{out} dr. \quad (8.2)$$



**Figure 4 Calculation scheme: 1 – tube of heat exchanger, 2 – sections of special ribbing**

Where  $\alpha_1 = 17,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$  is the coefficient of linear temperature expansion for steel at  $100^\circ\text{C}$ ,  $r_{out}$  is the outer radius of the tube,  $r_{in}$  is the inner radius of the tube.

Integration constants can be defined by the formulas:

$$C1 = \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \cdot \frac{1}{r_{out}^2 - r_{in}^2} \cdot \int_{r_{in}}^{r_{out}} \alpha_1 \cdot t(r) \cdot r_{out} dr. \quad (8.3)$$

$$C2 = \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \cdot \frac{r_{in}^2}{r_{out}^2 - r_{in}^2} \cdot \int_{r_{in}}^{r_{out}} \alpha_1 \cdot t(r) \cdot r_{out} dr. \quad (8.4)$$

Where  $\mu = 0,3$  is the Poisson's ratio for steel.

The change in tube size due to temperature deformation can be determined by the formula:

$$U = \frac{1}{r_{out}} \cdot \frac{1 + \mu}{1 - \mu} \cdot \int_{r_{in}}^{r_{out}} \alpha_1 \cdot t(r) \cdot r_{out} dr + C1 \cdot r_{out} + \frac{C2}{r_{out}}. \quad (8.5)$$

The resulting gap can be found by the formula:

$$\delta_1 = \delta_0 - U. \quad (8.6)$$

This is the gap value and should be used for further calculations.

## 9. The results of the calculation

Mathematical modeling was performed for two values of the gap 0.00014 m and 0.000118 m. The results are presented in Table 1 and Table 2.

Table 1

**The results of the calculation at the gap  $\delta_0=0.00014$  m**

The system under consideration	$t_w, ^\circ\text{C}$	$t_w, ^\circ\text{C}$	$K, \frac{W}{^\circ\text{C}}$	$K_e, \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$Q, J$
Ribbed with free convection	80	17.2	0.061	1.73	6.23
Ribbed with forced convection	80	17.2	0.936	15	53.9
Without ribbing	80	—	—	0.53	1.92

When analyzing tables 1 and table 2 it can be seen that the highest heat flux and the heat transfer coefficient are observed in the finned system during forced convection, which confirms the correctness of the created mathematical model. In second place, these are the free-convection fin system, and finally, the non-fin system has the worst performance.

Table 2

The results of the calculation at the gap  $\delta_1=0.000118$  m

The system under consideration	$t_m, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	$K, \frac{W}{^\circ\text{C}}$	$K_e, \frac{W}{m^2 \cdot K}$	$Q, J$
Ribbed with free convection	80	17,2	0,061	1,74	6,278
Ribbed with forced convection	80	17,2	0,936	15,92	57,33
Without ribbing	80	—	—	0,53	1,92

When comparing tables 1 and table 2 it can be seen that, taking into account the thermal deformations occurring in these systems, the actual gap  $\delta_1$  between the pipe and the ribbing sections decreases (Figure 5), which in turn increases the heat flow and improves the heat transfer process as a whole.

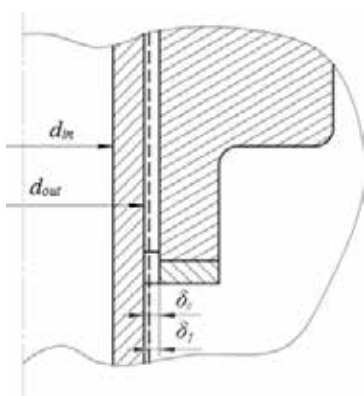


Figure 5. Scheme of influence of temperature deformations on the gap size

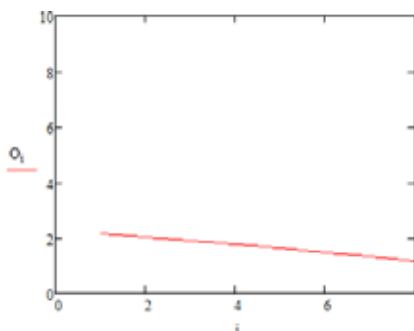
The graphs of the dependences  $Q=f(\Delta T)$  (Fig. 6, Fig. 8) show that for the first iteration of the temperature change, as the temperature difference decreases, the heat flow for the free-convection finned system and for the non-finned system decreases, which is regular since the heat flow is directly proportional to the temperature difference.

The graph of dependence  $Q=f(W)$  (Figure 7) shows that as the rate of motion of the cold coolant (air) increases, the heat flow transmitted through the whole structure increases. As the coolant velocity increases, the Reynolds criterion increases, which in turn turbulates the flow, increases the heat transfer coefficient, and has a positive effect on the heat transfer process as a whole.

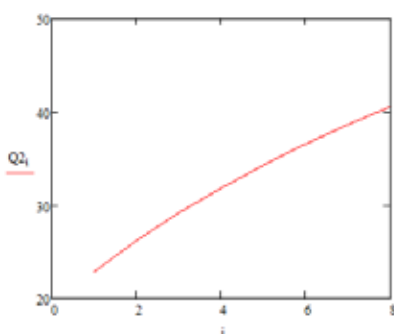
## 10. Conclusions

The mathematical model formulated adequately and describes the process of heat transfer in the considered systems, which is confirmed by the obtained results. The proposed model takes into account the precision of manufacturing and installation of ribbing elements on the heat exchanger





**Figure 6. Inverse graph of the  $Q$  heat flux versus the temperature difference system  $\Delta T$  for a free convection finned system**

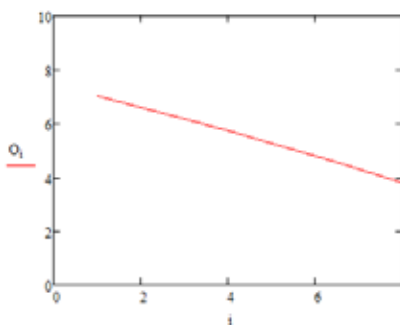


**Figure 7. Graph of the dependence of the heat flux  $Q$  on the rate of cold coolant (air)  $W$  for a finned convection system**

equipment (technological clearance and its influence on the amount of transmitted heat flow are taken into account). This model takes into account both free and forced convection, as well as the effect of temperature deformation on the size of the technological gap.

A number of dependencies have been obtained, which allow us to find the optimal operating conditions of these systems, which can greatly simplify the process of designing and calculating heat exchange equipment with finned surfaces.

Based on the results of process modeling based on the developed mathematical model, it can be argued that one of the main factors that affect the efficiency of the fin and heat transfer process in general is the gap between the tube and the ribbed sections. When designing and calculating heat exchanger equipment with ribbed surfaces, it is necessary to take into account temperature deformations, which can both negatively and pos-



**Figure 8. Inverse graph of  $Q$  heat flux versus temperature difference  $\Delta T$  for a non-ribbed system**

itively affect the efficiency of heat exchange processes. Also, the finning efficiency of hot and cold heat carriers (water and air, respectively) will affect the finning performance.

It can be concluded that the ribbing of the proposed configuration can be applied to significantly increase the area of heat exchange of equipment with tubular elements (eg shell and tube heat exchangers) provided there is sufficient space and conditions for the installation of rib sections.

### References:

1. Ysachenko V.P., Osypova V.A., Sukomel A.S. (1975). *Teploperedacha. Uchebnik dlya vuzov* [Heat transfer. Textbook for universities]. Moscow: Energiya. (in Russian)
2. Zhang C., Li Y. (2017). Thermodynamic analysis on theoretical models of cycle combined heat exchange process: The reversible heat exchange process. *Energy*, no 124, pp. 565–578.
3. Song J., Liu Z., Ma Z., Zhang J. (2017). Experimental investigation of convective heat transfer from sewage in heat exchange pipes and the construction of a fouling resistance-based mathematical model. *Energy and Buildings*, no 150, pp. 412–420.
4. Kostik S., Obodovich A.N. (2014). Issledovanie tekhnicheskikh i teplofizicheskikh kharakteristik universal'nogo sushil'nogo stenda po obezvozhivaniyu termolabil'nykh materialov [Investigation of technical and thermophysical characteristics of universal drying stand for dehydration of thermolabile materials]. *Molodoy ucheniy*, no 4, pp. 195–198.
5. Kostyk S.I., Ruzhynska L.I., Shybetskyi V.Yu., Revtov O.O. (2016). *Matematychni modeljuvannja ghidrodynamiky peremishujuchogho prystroju z maghnitnym pryvodom* [Mathematical simulation of hydrodynamics of the mixing device with magnetic drive]. *ScienceRise*, no 4 (2(21)), pp. 27–31.
6. Kostyk S., Shybetskyi V., Plashykhin S. (2019). Solution of criterion equations missing problems in calculations of special equipment by computer modeling methods. Proceedings of the *Sjoma mizhnarodna naukovo-praktychna konferencija Komp'juterne modeljuvannja v khimiji i tekhnologijakh ta systemakh stalogho rozvytku (Ukraine, Kiev, May 6-8, 2019)*. Kyiv: KPI im. Ighorja Sikorsjkogho, pp. 49–52.

## IMPROVING THE ACCURACY OF THE GRAVIMETRIC METHOD FOR CONTROL PARTICULATE MATTER IN DIESEL EXHAUST

Andrey Polivyanchuk<sup>1</sup>

Igor Gritsuk<sup>2</sup>

Elena Skuridina<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-59>

**Abstract.** The work is devoted to solving the actual scientific-practical problem of improving the accuracy of the gravimetric method of control of the normalized ecological index of diesel engines – average operating mass emissions of particulate matter (PM) with exhaust gases – indicator PT. Based on the analysis of requirements of regulatory documents – international standard ISO 8178, UNECE Regulations R-83, R-49, R-96 and others regarding the conditions of gravimetric measurements of this indicator, as well as the world and own experience of such measurements, the authors identified the factors that influence the accuracy of the gravimetric method of PM control and made recommendations for improving the accuracy of this method. To evaluate the effectiveness of the recommendations created a scientific – practical base for studies of the accuracy of gravimetric measurements of PM, consisting of: mathematical models for determination of temperature conditions of sampling in systems of mass emission control of PM – tunnels and the resulting error in PT measurements; experimental setup and research methodology for determining methodological error of PT measurements, which depends on the temperature conditions of sampling in the tunnel; method of estimating the significance of instrumental –  $\delta PT_{in}$  and methodical –  $\delta PT_{tr}$  components of the resulting measurement error of the indicator PT –  $\delta PT$ . On the basis of this scientific-practical base, experimental and computational studies of the accuracy of the gravimetric

---

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor,  
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Kherson State Maritime Academy, Ukraine

<sup>3</sup> Assistant of the Department of Urban Environmental Engineering,  
O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

PM control method, which meets the requirements of the international standard ISO 8178, were carried out, and installed instrumental, methodological and resultant measurement errors of average operating emissions PM emission using this method:  $\delta PT_{in} = \pm 3.3 \dots \pm 4.5 \%$ ;  $\delta PT_{tr} = -4.5 \dots -6.3 \%$ ;  $\delta PT = -9.0 \dots -10.8 \%$ . The effectiveness of the recommendations made by the authors is confirmed and it is established that their implementation allows to increase the accuracy of the gravimetric method of PM control in 3 times by eliminating the error  $\delta PT_{tr}$  and reducing the value of  $\delta PT$  to the minimum level of instrumental error  $\delta PT_{in} = \pm 3.3 \%$ .

### 1. Introduction

With the entry into force of EURO standards since 1993 to the average ecological performance of diesel engines has been introduced by the average mass emission of particulate matter (PM) with exhaust gases (EG) – an indicator of PT. According to the requirements of normative documents – international standard ISO 8178, UNECE Regulations R-83, R-49, R-96 and others. this indicator is determined by the gravimetric method with the use of special equipment – tunnel in the course of the regulated test cycles.

Among the pollutants contained in EG diesel, PM occupy the second place after nitrogen oxides by the level of negative impact on the environment and are characterized by the highest relative aggressiveness (compared to carbon monoxide), equal to 200. Due to the high toxicity of PM over the last 20 years, there has been an expansion in the area of emission normalization of this substance on diesel for various purposes. Today, PM emission standards are set for diesel cars, tractors, locomotives, off-road vehicles, marine and river vessels. From 2015, the allowable emission level of PM from EG of automobile diesels is 0.005 g / (kWh), which is 72 times less than when EURO standards were introduced. At this level of emissions, the resulting measurement error of PT in the test –  $\delta PT$  is significant and reaches 25...35% [1]. There is also a decrease in emissions of PM from EG other types of diesel engines. Since the accuracy of the gravimetric PM control method is a determining factor characterizing its practical applicability in determining the low emission levels PM with the exhaust gases of modern diesels, the task of creating a scientific basis and implementing practical measures to increase the sensitivity of this method is urgent.

## 2. The purpose and objectives of the research

The purpose of this work was to improve the accuracy of the normalized gravimetric method of PM control by establishing and taking into account the factors that affect it. To achieve this goal, the following tasks were solved: 1) analysis of the gravimetric PM control method, factors that influence the measurement error of the PT index and development of recommendations for improving the accuracy of this method; 2) creation of a scientific-practical base for studies of the resulting measurement error of the PT index and its components; 3) study the accuracy of the gravimetric PM control method and evaluate the effectiveness of the recommendations made.

## 3. Analysis of gravimetric method of PM control and factors that affect its accuracy

**The main components of diesel PM.** Term PM means all material collected on a special filter medium from a fluoroplastic material after passing through it the diesel engine EG, diluted with atmospheric air to a temperature not exceeding 52°C and greater than 42°C.

PM is a multicomponent formation comprising the following elements: diesel soot (product of pyrolysis of fuel), soluble organic fraction – SOF (hydrocarbon fuels and oils which are not burned and condensed and adsorbed on the surface of soot particles), sulfates (salts of sulfur) and other inclusions (wear products, ash additives, etc.). The relative shares of these elements in the composition of PM depend on the mode of operation of the diesel and vary over wide ranges [2] (Figure 1).

**Dilution systems diesel exhaust air** – tunnels. To measure PM emissions from EG diesel used tunnel – pipeline, in which the diesel engine exhaust gas

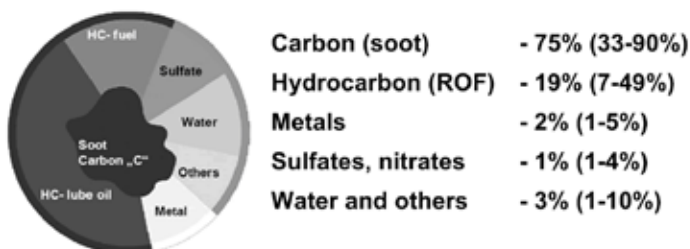
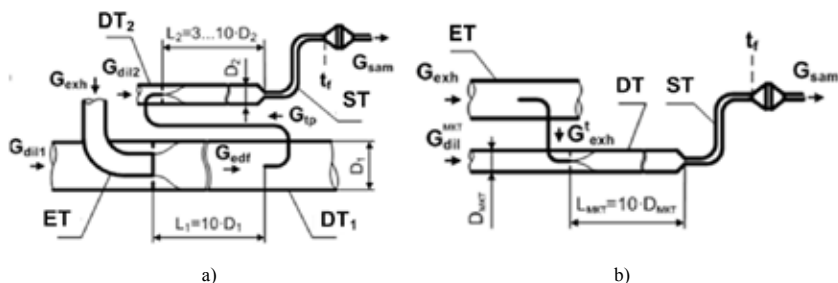


Figure 1. The components of the PM and their relative shares

is diluted with clean air to simulate the natural process of dispersing the pollutants contained in the diesel engine in the atmosphere (Figure 2).



**Figure 2. Dilution tunnels:**

**a) full-flow with 2-fold dilution of EG; b) microtunnel**

The reference system for PM emission control is a full-flow tunnel in which all the diesel engine exhaust air is diluted: if their mass flow rate does not exceed 750... 900 kg/h, then a 1-fold dilution of the exhaust gas in the pipeline with a diameter  $D \geq 46$  cm and a length  $L = 10 \cdot D$ , otherwise – a 2-fold dilution of EG is carried out in the pipelines: primary with  $D_1 = 20...46$  cm,  $L_1 = 10 \cdot D_1$  and secondary with  $D_2 = 2,5...10$  cm,  $L_2 = 2,5...10 \cdot D_2$ . The results of determining the PT value by any other measuring system must coincide with the results of the reference tunnel with a correlation coefficient of not less than 0.95. The alternative for bulky and cost reference tunnels are compact and more affordable partial flow VH dilution systems: minitunnels and microtunnels having dimensions:  $D_{MT} = 7,5...12$  cm,  $L_{MT} = 10 \cdot D_{MT}$  and  $D_{MKT} = 2,5...4$  cm,  $L_{MKT} = 10 \cdot D_{MKT}$  respectively [3; 4].

#### **Procedures for determining average PM emissions – test cycles.**

Depending on the type of diesel, the average PM emission is the PT is determined during the test cycle, which consists of normalized diesel modes, characterized by: crankshaft speed –  $n$ , load –  $L$ , weight factor –  $WF$ . Thus, when testing motor cars, the 13-stage ESC cycle (from «European Stationary Cycle») established by UNECE Regulation R-49 is used, the agricultural diesel engine is the 8-stage cycle established by UNECE Regulation R-96 (Table 1), diesel locomotives – 3-stage cycle, established by the international standard ISO 8178, etc.

Table 1

Test cycle of agricultural diesel engines

№ mode	n	L, %	WF
1	nominal	100	0,15
2		75	0,15
3		50	0,15
4		10	0,1
5	intermediate	100	0,1
6		75	0,1
7		50	0,1
8	idling	-	0,15

**Dilution modes of EG in tunnels.** In accordance with the requirements of international standard ISO 8178, the following dilution modes of EG can be used in tunnels. DM1 – CVS mode (from "Constant Volume Sampling"), in which the mass flow of diluted EG in the tunnel is maintained constant throughout the cycle; DM2 – a mode with a constant value of the dilution factor EG; when using this mode the concentrations of PM in the diluted EG increase, which allows to increase the accuracy of their determination.

**Calculation of mass and mid- average PM emissions.** Mass PM emissions with diesel exhaust at separate test modes –  $PT_{massi}$  are determined by the formula:

$$PT_{massi} = \frac{m_{fi}}{m_{sami}} \cdot \frac{G_{edfi}}{1000}, \text{ g/h};$$

where  $m_{fi}$  – the mass of PM on the filter collected on the i-th mode, mg;  
 $m_{sami}$  – the mass of the diluted EG sample passed through the mode filter, kg;  
 $G_{edfi}$  – equivalent mass flow of diluted EG in the ith mode (equal to the mass flow rate of the diluted EG in the reference system), kg/h:

$$G_{edfi} = G_{exhi} \cdot q_i,$$

where  $q_i$  – the dilution factor of EG in the i-th mode;

$G_{exhi}$  – the mass flow rate of diesel exhaust at the i-th mode, kg/h.

The average PM emission with diesel exhaust gas – PT is defined as the ratio of the average for the PM mass cycle –  $PT_{mass}$  and the effective diesel power –  $P_m$ :

$$PT = \frac{PT_{mass}}{P_m}, \text{ g/kWh}, \quad (1)$$

The value of  $PT_{mass}$  is calculated by the formula

$$PT_{mass} = \frac{m_f}{m_{sam}} \cdot \frac{G_{edf(m)}}{1000}, \text{ g/h}, \quad (2)$$

where  $m_f$  – the mass of PM collected on the filter per cycle, mg;

$m_{sam}$  – the mass of the diluted EG sample that has passed through the filter over the cycle, provided that the values of  $m_{sami}$  are proportional to the respective weighting factors –  $WF_i$  (at 2-fold dilution of EG  $m_{sam} = m_{sam2} - m_{dil2}$ ), where  $m_{sam2}$ ,  $m_{dil2}$  – the masses of diluted EG and air, passed through the filter during the cycle), kg;

$G_{edf(m)}$  – the average equivalent mass flow rate of diluted EG in the tunnel, kg/h.

The values included in formula (2) are defined as follows:

$$m_{sam} = \sum_{i=1}^n m_{sami}, \quad (3)$$

where  $n$  – the number of modes in cycles;

$$G_{ed(m)f} = \sum_{i=1}^n WF_i \cdot G_{edfi}, \text{ kg/h}. \quad (4)$$

To calculate  $P_m$  use the formulas:

$$P_m = \sum_{i=1}^N (P_i \cdot WF_i), \text{ kW}, \quad (5)$$

where  $P_i$  – the effective power of the diesel engine in the  $i$ -th mode, kW;

$$P_i = \frac{n_i \cdot M_{ki}}{9550} - P_{auxi}, \text{ kW}, \quad (6)$$

where  $n_i$  – the number of revolutions of the motor shaft on the  $i$ -th mode,  $\text{min}^{-1}$ ;

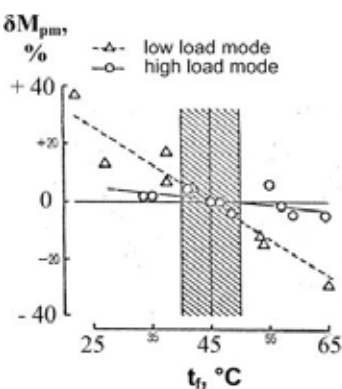
$M_{ki}$  – torque on the  $i$ -th mode,  $\text{N}\cdot\text{m}$ ;

$P_{auxi}$  – the power of auxiliary equipment on the  $i$ -th mode, kW.

**Factors affecting the accuracy of the gravimetric PM method.** The analysis of the presented technique for determining the average PM emission shows that this indicator is indirectly measured by the results of direct measurements of  $m_f$ ,  $m_{sam}$ ,  $q_i$ ,  $G_{exhi}$ ,  $n_i$  and  $M_{ki}$ . Therefore, the accuracy of determining the PT is dependent on the measurement errors of these values.



On the other hand, the results of experimental studies of foreign and domestic authors, presented in [5-10], indicate that the mass of the PM collected on the filter –  $m_f$  depends on the temperature mode of sample preparation in the tunnel (Figure 3), which is characterized by the temperatures of diluted EG before the filter –  $t_{fi}$  is determined by the dilution air temperature – tilt selected maximum sample temperature in the tunnel –  $t_{f(max)}$ ... Variation of  $t_{dil}$  values  $t_{f(max)}$  in the admissible regulatory documents ranges –  $t_{dil} = 25 \pm 5^\circ\text{C}$  and  $t_{f(max)} = 42-52^\circ\text{C}$  leads to a methodological error in the measurement of the PT, which affects the accuracy of the gravimetric method of PM control.



**Figure 3. Experimental data on the effect of temperature  $t_f$  on the value of  $m_f$  [10]**

Analysis of the experimental data presented in Fig. 3, shows that as the temperature  $t_f$  increases, the value of  $m_f$  decreases; however, a linear dependence can be used to describe this process:

$$\delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{t_{f0}}}{m_f^{t_{f0}}} \cdot 100\% = k_{tf} \cdot (t_f - t_{f0}),$$

where  $\delta m_f^{tf}$  – the relative deviation of the PM weight at the sample temperature  $t_f$  –  $m_f^{tf}$  from the base value  $m_f^{t_{f0}}$ , which corresponds to the sample temperature  $t_{f0}$ , taken as the base (in the data presented in Fig. 3,  $t_{f0} = 45^\circ\text{C}$ );

$k_{tf}$  – proportionality factor, which depends on the mode of operation of the engine: as the diesel power increases, its value decreases.

**Recommendations for improving the accuracy of gravimetric PM control.** The analysis of the factors on which the resulting measurement error of the normalized PT indicator depends, makes the following recommendations for its reduction:

1) the use in the tunnel dilution mode EG DM2 at the minimum allowable dilution factor  $EG - q_{min} = 4$ , which ensures the selection of the maximum number of PM on the filter;

2) elimination of methodological error of PT measurements by adjusting the temperature of the sample preparation in the tunnel, which meets the conditions of dilution of EG at  $t_{dil} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $t_{f(max)} = 47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

3) improving the accuracy of measurement values that are directly determined during testing and used in the calculation of the PT.

#### 4. Scientific-practical basis for studies of the accuracy of gravimetric control method PM

##### 4.1 Mathematical model of the process of formation of temperature conditions for PM sampling

The mathematical model is intended to determine the main characteristic of the temperature mode of selection of PM in the tunnel – the sample temperature before the filter –  $t_f$ .

In based the mathematical model is on the equation of heat balance of the process of heat exchange of heated gas in a cylindrical pipeline with ambient air (Figure 4) [11]:



Figure 4. Calculation scheme of the heat exchange process

$$H_a = H_b + Q_w + Q_l, \quad (7)$$

where  $H_a$ ,  $H_b$  – the enthalpy of the gas stream at the inlet and outlet of the pipeline;

$Q_w$  – the heat flow transmitted through the wall of the pipeline due to heat transfer;

$Q_l = r \cdot H_a$  – thermal losses on the elements of the design of the sampling line at the flange connections and ball cranes (the proportionality factor  $r$  is determined experimentally by the formula  $r = 1 - (H_b - Q_w)/H_a$ );

$$H_a = c_p \cdot G \cdot (T_a - T_{dil}); \quad H_b = c_p \cdot G \cdot (T_b - T_{dil}),$$

where  $c_p = 1005\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  – the average isobaric heat capacity in the working range of the temperature variation of the working body in the tunnel;

$G$  – mass rate flow in the pipeline of the of the flow of the working body, kg/s;  
 $T_a, T_b$  та  $T_{dil}$  – respectively: absolute initial and final average mass temperature flow rates and air temperature around the pipeline, K;

$$Q_w = (T_m - T_{dil}) \cdot F \cdot k,$$

where  $T_m$  – the average absolute temperature of the gas flow in the tunnel (defined as the arithmetic mean of  $T_a$  and  $T_b$ ), K;

$F$  – the surface area of the pipeline through which heat is transmitted, m<sup>2</sup>;

$k$  – heat transfer coefficient, W/(m<sup>2</sup>·K):

$$k = \frac{1}{(\alpha_t)^{-1} + (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})^{-1}} = \frac{\alpha_t \cdot (\alpha_{wc} + \alpha_{wr})}{\alpha_t + \alpha_{wc} + \alpha_{wr}},$$

where  $\alpha_t$  – the heat transfer coefficient of the inner wall of the pipeline, W/(m<sup>2</sup>·K);

$\alpha_{wc}, \alpha_{wr}$  – the heat transfer coefficients of the outer wall of conduit with convective and radiant heat transfer (determined by known formulas below), W/(m<sup>2</sup>·K).

As a result of the transformation of the heat balance equation (7), the basic calculation formula was obtained to determine the gas flow temperature at the end of the pipeline the flow of diluted EG –  $t_b$ :

$$t_b = (1 - r) \cdot (t_a - t_{dil}) - \frac{(t_m - t_{dil}) \cdot F \cdot k}{c_p \cdot G} + t_{dil}, \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (8)$$

where  $t_a$  – the initial average mass temperature flow, °C.

Since the value of  $t_m$  at the beginning of the calculations is unknown, that's why the determination of the temperature values  $t_b$  is carried out by the method of successive approximations. This determines the approximate value of  $t_b$  provided  $t_m = t_a$ , which is refined as a result of using formula (8) until the difference between the clarification and the previous values  $t_b$  of  $t_b$  is less than  $\pm 0.05$  °C (for this is enough 3– 4 refinement calculations). The sequential calculation of the end temperatures of the gas streams in all pipelines of the dilution system EG according to the established algorithm allows to determine the sample temperature before the filter –  $t_r$ .

**Check the adequacy of the mathematical model** was according by Fisher's criterion during the tests of the 4ChN12/14 diesel engine on the ESC cycle (Table 2) using the microtunnel MKT-2 [9; 12].

Table 2

**The results of researches of the value of  $t_f$  during the tests diesel 4ChN12/14 with MKT-2**

A series of experiments (cycle mode ESC)	Experiment number in the series	$t_f, ^\circ\text{C}$	$\bar{t}_f, ^\circ\text{C}$	$t_{af}, ^\circ\text{C}$	$t_{af} - t_f, ^\circ\text{C}$	$t_f - \bar{t}_f, ^\circ\text{C}$
1 (1)	1	22,2	22,1	21,88	-0,22	0,1
	2	22,0				-0,1
2 (3)	1	47,1	46,85	46,94	0,09	0,25
	2	46,6				-0,25
3 (7)	1	34,3	34,55	34,29	-0,26	-0,25
	2	34,8				0,25
4 (10)	1	50,0	50,4	49,97	-0,43	-0,4
	2	50,8				0,4

Criterion F was determined by the formula:

$$F = \frac{s_a^2}{s_y^2},$$

where  $s_a^2$  – the variance of model adequacy;

$s_y^2$  – the variance of the reproducibility of the experiment.

To determine the value of  $s_a^2$  used the formula that is used for uniform duplication of investigation:

$$s_a^2 = \frac{S_a}{f_a} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^N (t_{afi} - \bar{t}_{fi})^2}{N - p}$$

where  $S_a$  – the sum of the squares of the deviations of the calculated and experimental data;

$f_a = N - p$  – the number of degrees of freedom of variance of model adequacy;

$n=2$  – number of duplicate investigation in each series;

$N = 4$  – number of series of duplicate investigation according to the experimental plan (series of investigation were performed on 1, 3, 7 and 10 modes of the ESC cycle);

$i = 1 \dots N$  – the number of the series of investigation;

$t_{afi}$  – the calculated value of the temperature  $t_f$  for the  $i$ -th series;

$\bar{t}_f$  – average temperature  $t_f$  for the  $i$ -th series;

$p = 1$  – the number of coefficients of the mathematical model determined according to experiment.

Dispersion of the reproducibility of the experiment was determined by the results of 4 duplicate experiments, as the arithmetic mean of the dispersions of these experiments:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^m s_i^2}{m}$$

where  $m = 4$  – the number of series of duplicate experiments;

$s_i^2$  – variance of reproducibility of the experiment  $i$ -th series of experiments:

$$s_i^2 = \frac{\sum_{j=1}^n (t_{ij} - \bar{t}_i)^2}{n - 1}$$

where  $n = 2$  – the number of duplicate experiments;

$t_{ij}$  – the  $j$ -th value of the temperature  $t_f$  in the  $i$ -th series of experiments.

The number of degrees of freedom of dispersion  $s_y^2$  for this method of determining it is  $f_y = m \cdot (n - 1) = 4$ .

The calculations of  $s_a^2$ ,  $s_y^2$  and  $F$  by the formulas below showed the following:

$$s_a^2 = \frac{2 \cdot (0,22^2 + 0,09^2 + 0,26^2 + 0,43^2)}{4 - 1} = 0,2063 ,$$

$$s_y^2 = \frac{(0,1^2 + 2 \cdot 0,25^2 + 0,4^2)}{4} = 0,0738 ,$$

$$F = \frac{0,2063}{0,0738} = 2,85$$

The obtained values of  $F$  do not exceed the critical level –  $F_{0,95} = 5,91$ , which corresponds to trust probability of 0,95 and the numbers of degrees of freedom  $f_a = 3$ ,  $f_y = 4$  [13] that confirms the adequacy of the developed mathematical model.

## 4.2 Mathematical model for determining the resulting error in the meas-urement of weighted average PM – $\delta PT$

The mathematical model allows to determine the value of  $\delta PT$  taking into account its instrumental –  $\delta PT_{in}$  and methodical –  $\delta PT_{tr}$  components:

$$\delta PT = \delta PT_{in} + \delta PT_f \quad (9)$$

The value of  $\delta PT_{in}$  is determined using the dependence to calculate the error of the indirect measurement result [14]:

$$\delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} \cdot \frac{x_i}{y} \cdot \delta x_i \right)^2}, \quad (10)$$

where  $y$  – a value that is measured indirectly by a known dependence –  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ ;

$x_i$  – the values by which it is determined  $y$ ,  $m$  – their number.

The error  $\delta PT_f$  is numerically equal to the value of  $\delta m_f^{tf}$  – relative deviation of the mass of the hinge PM –  $m_f^{tf}$ , determined at the actual values of the temperatures  $t_{fi}$ , from the mass of the hinge PM –  $m_f^{t0}$ , determined at the values of the temperatures  $t_{f0i}$ , taken at the baseline and corresponding CVS-dilution of EG at  $t_{dil} = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{l(max)} = 47^\circ\text{C}$ :

$$\delta PT_f = \delta m_f^{tf} = \frac{m_f^{tf} - m_f^{t0}}{m_f^{t0}} \cdot 100\% = \sum_{i=1}^n \frac{m_{fi}^{tf} - m_{fi}^{t0}}{m_{fi}^{t0}} \cdot r_{mfi} = \sum_{i=1}^n \delta m_{fi}^{tf} \cdot r_{mfi}, \quad (11)$$

where  $\delta m_{fi}^{tf}$  – relative deviations of the mass of PM on the  $i$ -th mode –  $m_{fi}^{tf}$  from the base values –  $m_{fi}^{t0}$

$r_{mfi} = (m_{fi}^{t0}/m_{fi}^{t0}) \cdot 100\%$  are the relative shares of  $m_{fi}^{tf}$  in the total mass of  $m_{fi}^{t0}$

To determine the values of  $\delta m_{fi}^{tf}$ , experimental dependences are used, whose appearance is chosen taking into account the results of previous studies (see Fig. 3):

$$\delta m_{fi}^{tf} = k_{gfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}), \quad (12)$$

where  $k_{gfi}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$  – the proportionality factor, which is a function of the relative number of revolutions –  $\bar{n}_i$  and load –  $\bar{L}_i$ ;

Values  $\bar{n}_i$  and  $\bar{L}_i$  characterize the mode of operation of the engine and are determined by the following:

$$\bar{n}_i = \frac{n_i - n_{idle}}{n_{nom} - n_{idle}}, \quad (13)$$

where  $n_{idle}$  and  $n_{nom}$  – the number of revolutions on idle move and mode rated power;

$$\bar{L}_i = \frac{M_{ki}}{M_{k(max)i}}, \quad (14)$$

$M_{k(max)i}$  – the maximum torque on the motor shaft at  $n_i$ .

### 4.3. Experimental installation and methods for investigating methodological error $\delta PT_f$

To determine the coefficients  $k_{tf}$ , used in the calculation of methodological error  $\delta PT_f$ , an experimental setup and a methodology for its determination have been developed.

**Schematic diagram of the experimental setup, its specifications** (Figure 5).

The installation includes two main elements:

1) two-channel PM sampling line, which includes the control channel (it gathers mass PM –  $m_1$ ) and the heated channel it collects the mass of PM –  $m_2$ , at a temperature  $t_p$ , more than in control channel, fixed value  $\Delta t_p$ ; this equipment is designed to measure the  $k_{tf}$  coefficient in any engine operating mode;

2) a camera for stabilization and weighing of filters, which is designed to determine the masses of the hanging  $m_1$  and  $m_2$ .

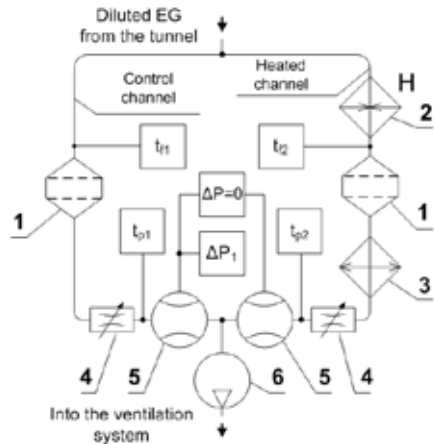
When determining the  $k_{tf}$  coefficient in the PM sampling line, two conditions are met:

a) the sample temperature  $t_{f1}$  in the heated channel exceeds the corresponding sample temperature  $t_{f2}$  in the control channel by magnitude by  $\Delta t_f = 20 \pm 0.5^\circ\text{C}$  (provided by heater 2);

b) the mass flow rates of the diluted EG samples in both channels created by the gas blower 6 are kept constant with an error of  $\pm 2\%$  (by maintaining the temperature equal to  $t_{p1}$  and  $t_{p2}$  and zero pressure drop between flowmeters 5 with normal nozzles).

To determine the  $k_{tf}$  coefficient, the dependence is used:

$$k_{tf} = \frac{m_2 - m_1}{m_1 \cdot \Delta t_f} \cdot 100\% = \frac{\delta m_f}{20}, \% \cdot (^\circ\text{C})^{-1},$$



**Figure 5. Experimental setup  
for measuring  $k_{tf}$  coefficients:**  
1 – ammunition with a filter; 2 –  
heater; 3 – cooler; 4 – regulators of  
mass flow rates; 5 – mass flowmeters;  
6 – gas blower

where  $\delta m_f$  – the relative deviation of the mass PM caused by temperature rise  $t_f$ .

The relative error of determining the coefficients of  $k_{tf}$  is  $\pm 7 \dots 12\%$ , while the greater value of the error corresponds to modes with low engine load.

**Methodology of studies of the effect of temperature mode selection prob PM to the weight of the hinge PM.** This method can be experimentally determined by the dependence of the diesel engine on the proportionality coefficients  $k_{tf}$ , which take into account the effect of the temperature  $t_f$  on the PM sample weight (see formula (12)) and used in determining errors  $\delta P T_{tf}$  (see formula (11)). The determined dependence has the form  $-k_{gf}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$ , where  $\bar{n}_i$  and  $\bar{L}_i$  – the parameters that characterize the test mode (see formulas (13), (14)).

Before starting the experiment, the normalization of variables  $\bar{n}$  and  $\bar{L}$ :

$$X_1 = \frac{\bar{n} - \bar{n}_{mid}}{\Delta n};$$

$$X_2 = \frac{\bar{L} - \bar{L}_{mid}}{\Delta \bar{L}},$$

where  $\bar{n}_{mid} = \bar{L}_{mid} = 0,5$  – the average values of the ranges of variation,  $\bar{n}$ ,  $\bar{L}$ ;

$\Delta \bar{n} = (n_{nom} - n_{idle})/4$ ;  $\Delta \bar{L} = M_{k(max)}/4$  – steps for changing parameters  $\bar{n}$  and  $\bar{L}$ .

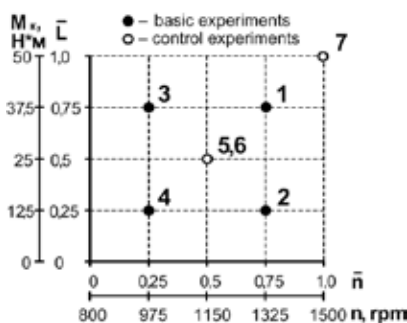
It is assumed that the dependence of the coefficient  $k_{tf}$  on the variables  $X_1$  and  $X_2$  has the form of a polynomial of the 1-st degree:

$$k_{gf} = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 \quad (15)$$

where  $a_0$ ,  $a_1$  and  $a_2$  – constant coefficients.

To determine the coefficients of the polynomial and evaluate its accuracy, a 2-factor experiment is conducted, consisting of 4 basic and 3 control investigation (Figure 6).

The coefficients of regression dependence (15) are determined by the expressions [15]:



**Figure 6. Plan of 2-factor experiment for determination of polynomial (15)**



$$a_0 = \frac{k_{f1} + k_{f2} + k_{f3} + k_{f4}}{4}$$

$$a_1 = \frac{k_{f1} + k_{f2} - k_{f3} - k_{f4}}{4} ;$$

$$a_2 = \frac{k_{f1} - k_{f2} + k_{f3} - k_{f4}}{4} ,$$

where  $k_{fi}$  – the value of the  $k_{fp}$  coefficient determined in the  $i$ -th investigation. The adequacy of this dependence is estimated by the Fisher criterion –  $F$ .

#### 4.4. Methods for estimating the resulting error $\delta PT$ and the effectiveness of recommendations to reduce it

The resulting measurement error of the weighted average PM with EG emission from the diesel engine diesel and the effectiveness of the recommendations for its reduction are estimated by the following algorithm.

1. Selection of initial data for research – the results of tests of diesel on the ESC cycle, indicating all the parameters that affect the accuracy of measurements of the PT (error  $\delta PT$ ).

2. For each dilution mode EG, instrumental measurement errors of the weighted average PM –  $\delta PT_{in}$  emission are determined by successive calculations using the expression (10) of the error values calculated by formulas (1) – (6).

3. The ranges of variation of the method error  $\delta PT_{up}$ ; are established (taking into account the mode of dilution of EG); to this end, the expressions (11) and the method of planning the 2-factor experiment [15] are determined by

$$\delta PT_{tf} = f(t_{dil}, t_{f(max)}) \quad (16)$$

with the domain of the function  $t_{dil} = 20...30 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $t_{f(max)} = 42...52 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;

The absolute deviations of the value  $\delta PT_{tf}$ , calculated by dependence (16) from the values calculated by formula (11) shall not exceed  $\pm 0,05\%$ .

4. Installed: the variation range of the resulting error  $\delta PT$  (by expression (9)), as well as the value of the width of the variation range of the given error –  $\delta PT^{sum}$  and its components –  $\delta PT_j^{sum}$ :

$$\delta PT^{sum} = \delta PT^+ - \delta PT^- ; \delta PT_j^{sum} = \delta PT_j^+ - \delta PT_j^- ,$$

where the indices «+» and «-» correspond to the limit values of the ranges of variation of the corresponding errors in the area of positive and negative values;

$j$  – the index of the component of the resulting error (in or  $t_f$ ).

5. Determine the relative contribution (in %) to the resulting error  $\delta PT$  of each component –  $R_j$ :

$$R_j = \frac{\delta PT_j^{sum}}{\delta PT^{sum}} \cdot 100\%.$$

6. Calculations of the error  $\delta PT$  and its components are carried out, provided that the proposed recommendations for improving the efficiency of determining the PT indicator are fulfilled.

## **5. Results of experimental and computational studies of the accuracy of the gravimetric PM control method**

### **5.1. Determination of instrumental error of PT measurements**

As a result of applying dependence (9) to the values measured indirectly, formulas were calculated to calculate the error  $\delta PT_{in}$  and its maximum values for different modes of dilution of EG (Table 3).

Table 3

**The results of determining the instrumental error  $\delta PT_{in}$**

Error	Expression to calculate the error	The error value, %	
		DM1	DM2
$\delta G_{edf(m)}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^{13} (WF_i \cdot k_{Gedfi} \cdot \delta G_{edfi})^2}$	1,4	1,1
$\delta PT_{mass}$	$\sqrt{\delta M_f^2 + \delta M_{sam}^2 + (\delta G_{edf(m)})^2}$	4,4	3,1
$\delta P_i$	$\sqrt{\delta n^2 + \delta M_k^2}$	3,6	3,6
$\delta \bar{P}$	$\delta P_i \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (WF_i \cdot k_{P_i}^2)}$	1,2	1,2
$\delta PT$	$\sqrt{\delta PT_{mass}^2 + (\delta \bar{P})^2}$	4,5	3,3

### **5.2. Establishment and evaluation of methodological error of PT measurements**

As a result of the procedure of studies of the effect of temperature selection mode PM on the weight of the PM presented in section 4.3, a 2-factor experiment was conducted and the dependence of the  $k_{tf}$  coef-

ficient on the parameters of the engine operating mode was determined (Table 4, 5):

– when using normalized variables:

$$k_{ff} = -0,996 - 0,037 \cdot X_1 + 0,138 \cdot X_2;$$

– in the transition from normalized to initial variables (Figure 7)

$$k_{ff} = -1,20 - 0,148 \cdot \bar{n} + 0,552 \cdot \bar{L}. \quad (17)$$

Table 4

The results of the dependency experiment  $k_{ff}(\bar{n}_i, \bar{L}_i)$

№ д	Tunnel options			PM selection options (in the control channel)			Results tests	
	$G_{exh}, \text{r/c}$	$t_{exh}, ^\circ\text{C}$	$q$	$t_i, ^\circ\text{C}$	$m_i, \text{мг}$	$PT_{mass}, \frac{\text{г}}{\text{ч}}$	$\Delta t_i, ^\circ\text{C}$	$-\delta m_i, \%$
1	18,6	310	5,12	45,2	4,4	15,2	19,7	19,5
2	18,6	277	5,11	38,7	4,7	12,0	20,5	22,1
3	13,7	231	6,93	34,0	3,9	10,3	20,2	14,7
4	13,7	184	6,90	29,2	5,2	7,7	19,4	23,0
5	16,1	252	5,92	35,5	4,3	11,5	20,0	19,2
6	16,0	263	5,95	36,0	4,8	11,2	20,3	17,9
7	20,9	347	4,54	51,9	5,8	17,2	20,2	15,2

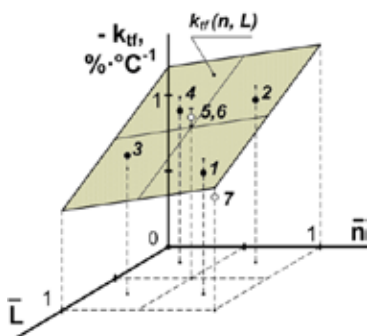
Table 5

Results of comparison of experimental –  $k_{ff}$  and calculated –  $k_{ffp}$  data

№ д	$X_1(\bar{n})$	$X_2(\bar{L})$	$-k_{ff} \cdot 10^{-2}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$-k_{ffp} \cdot 10^{-2}, ^\circ\text{C}^{-1}$	$\delta k_{ff}, \%$
1	1 (0,75)	1 (0,75)	0,99	0,90	9,3
2	1 (0,75)	-1 (0,25)	1,08	1,17	-8,6
3	-1 (0,25)	1 (0,75)	0,73	0,82	-12,7
4	-1 (0,25)	-1 (0,25)	1,19	1,10	7,8
5, 6*	0 (0,5)	0 (0,5)	0,92	1,00	-8,1
7	2 (1,0)	2 (1,0)	0,86	0,75	12,4

Note: \* – the average result of 2 measurements

The validity of expression (17) is confirmed by the fact that the relative deviations of the calculated values of  $k_{ff}$  from the experimental data are  $\pm 7.8 \dots 12.7\%$  (standard deviation calculated from the results of 2 duplicate investigation – the 5th and 6th equals  $\pm 0,056$  or  $4.7 \dots 6.5\%$ ) and are values of the same order with the error of the experiment –  $\pm 3 \dots 8\%$ .

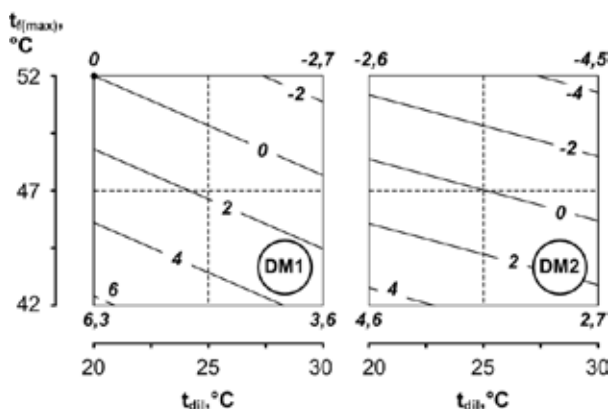


**Figure 7. Results of experimental determination of dependence  $k_{gf}(n_i, \bar{L}_i)$**

Thus, the methodical error  $\delta PT_{tf}$  can be estimated by the following formula (see expressions (11) and (12)):

$$\delta PT_{tf} = \sum_{i=1}^{13} \left( -1,20 - 0,148 \cdot \bar{n}_i + 0,552 \cdot \bar{L}_i \right) \cdot (t_{fi} - t_{f0i}) \cdot r_{mfi}.$$

The estimation of the value  $\delta PT_{tf}$ , carried out on the results of the tests of diesel 1Ch12/14 on the ESC cycle, shows that the ranges of variation of this error are: -4.5 ... 6.3% (difference of results – 10.8%) (Figure 8).



**Figure 8. The range of variation of the method error  $\delta PT_{tf}$**

### 5.3. Evaluation of the error $\delta PT$ , the significance of its components and the effectiveness of the recommendations developed

In accordance with the methodology described in paragraph 4.4, the calculated studies were conducted, during which the ranges of variation of the instrumental  $\delta PT_{in}$ , the methodical  $\delta PT_{tf}$ , and the resulting  $\delta PT$  errors in the measurements of the indicator PT. In the course of the research, the relative contributions to the error  $\delta PT$  of each of its components  $R_j$  were

evaluated, it was determined how the value of  $\delta PT$  and its components changes when making the recommendations made to improve the efficiency of measuring the value of PT.

The research results indicate the following:

– the components of the resulting measurement error of the PT index vary in the ranges:

a) subject to ISO 8178 standards carrying out tests:

$$\delta PT_{in} = \pm 3.3... \pm 4.5\%, \delta PT_{tr} = -4.5...6.3\%;$$

b) when conducting tests in the light of the recommendations made to improve the efficiency of determining the PT indicator:

$$\delta PT_{in} = \pm 3.3\%, \delta PT_{tr} = 0\%;$$

– when allowed dilution modes of EG, the resulting error  $\delta PT$  varies in the range -9.0 ... 10.8% (19.8% difference in results); the largest contribution to  $\delta PT$  is made by the methodological component – 55%; contribution of instrumental component – 45%;

– as a result of the implementation of the proposed recommendations, the resulting error  $\delta PT$  is reduced to  $\pm 3.3\%$  (the divergence of results of 6.6% is reduced by 3 times); with the contribution of the instrumental component in  $\delta PT$  increases to 100%.

### 6. Conclusions

Based on the analysis of requirements of regulatory documents – international standard ISO 8178, UNECE Regulations R-83, R-49, R-96 and others to the conditions of operation of mass emission control PM with EG diesel engines – tunnels, as well as world and own experience of using tunnels, recommendations are made to improve the accuracy of gravimetric method of PM control:

1) ensuring that the maximum possible mass of PM is sampled by the filter by maintaining the dilution coefficient of EG with air in the tunnel at the minimum permissible level –  $q = 4$ ;

2) elimination of methodological errors of measurements of mass emission of PM, which depend on temperature conditions of sampling of PM, due to the use of sample temperature regulators in the tunnels;

3) improving the accuracy of measurement values used in determining the average operating PM emission – PT.

A scientific and practical basis for conducting studies of the accuracy of gravimetric measurements of PM is created, which consists of: a mathematical model for determining the temperature conditions of sampling in tunnels, a mathematical model for evaluating the resulting error in the measurements of the metric  $PT - \delta PT$ ; experimental setup and research methodology to determine the methodological error of the  $PT - \delta PT_{tr}$  measurement, which depends on the temperature conditions of sampling in the tunnel; the method of estimating the significance of the components of the resultant error in the measurements of the PT index: instrumental –  $\delta PT_{in}$  and methodical errors.

Experimental and computational studies of the accuracy of the gravimetric PM control method, which meets the requirements of the international standard ISO 8178, average operational emissions PM when using this method:  $\delta PT_{in} = \pm 3.3... \pm 4.5\%$ ;  $\delta PT_{tr} = -4.5...6.3\%$ ;  $\delta PT = -9.0...10.8\%$ . The effectiveness of the recommendations made by the authors is confirmed and it is established that their implementation allows to increase the accuracy of the gravimetric method of PM control by 3 times by eliminating the error  $\delta PT_{tr}$  and reducing the value of  $\delta PT$  to the minimum level of instrumental error  $\pm 3.3\%$ .

### References:

1. Foote E. (2013). Evaluation of Partial Flow Dilution Methodology for Light Duty Particulate Mass Measurement. SAE Technical Paper 2013-01-1567, 10.
2. Perez J., Lipari F. & Seizinger D. (1984). Cooperative development of analytical methods for diesel emissions and particulates // SAE Technical Papers, 840413, 22.
3. Russel R. (1993). Development of a Miniaturized, Dilution-Based Diesel Engine Particulate Sampling System for Gravimetric Measurement of Particulates. SAE Technical Papers, 931190, 12.
4. Klimenko O. & Redziuk A. (2012). Research and development of a promising system for determining the mass emissions of pollutants in the exhaust gases of engines [in Ukrainian]. Avtoshlyahovik Ukraine, 5(229), 2–8.
5. Engeljehring K. (1993). Meeting ISO 8178 Requirements for the Measurement of Diesel Particulates with Partial-Flow Dilution Systems. SAE Technical Papers, 932466, 10.
6. Nagano H. (1990). Measurement of Unregulated Exhaust Emissions from Heavy Duty Diesel Engines with Mini-Dilution Tunnel. SAE Technical Papers, 900643, 10.
7. Lach G. (1988). Specific problems of sampling and measuring diesel exhaust emissions. SAE Technical Papers 881763, 12.

8. Redziuk A., Klimenko O. & Kudlenko O. (2012). With respect to the determination of the mass emissions of pollutants by wheeled vehicle engines. *Avtoshlyahovik Ukraine*, 4(228), 2–7. (in Ukrainian)
9. Polivyanchuk A. (2015). Improving the efficiency of diesel particulate emissions control systems: monograph [in Ukrainian]. Publisher KNAHU, Kharkiv, 220.
10. Hirakouchi N. (1989). Measurement of Diesel Exhaust Emissions with Mini-Dilution Tunnel. *SAE Technical Papers*, 890181, 11.
11. Bolgarsky A.V. & Mukhachev G.A. (1964). Thermodynamics and heat transfer. Higher school, 458. (in Russian)
12. Polivyanchuk A. (2015). Experimental verification of microtunnel MKT-2 on the brake stand autotractor diesel engine. *Industrial technology and engineering*, 2(15), 11–16.
13. Himmelblau D. (1973). Analysis of processes by statistical methods. World, 957. (in Russian)
14. Novinsky P. & Zograph I. (1985). Estimation of errors of measurement results. *Energoatomizdat*, St Petersburg, 248. (in Russian)
15. Raffles-Lamarca E. (1969). Experiment Planning Instructions. Ukrainian Design and Research Institute «UkrNIUgleobogashenie», Lugansk, 126.

## RESEARCH OF PROCESSES OF HYDROGEN EXTRACTION FROM THE GAS MIXTURE FORMED DURING THE HYDROGEN SULFIDE DECOMPOSITION

Arkadii Proskurin<sup>1</sup>

Yurii Halynkin<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-60>

**Abstract.** The theoretical and experimental principles and design solutions for the technology for the extraction of hydrogen from gas mixtures formed during the decomposition of hydrogen sulfide using metal hydride technologies, allowing to obtain hydrogen of high purity and pressure, are considered. Analytical equations and dependences of the physicochemical properties of reversible metal hydrides and basic organic liquids that can be used as carriers are determined. It was determined that the enthalpy ( $\Delta H$ ) and entropy ( $\Delta S$ ) formation of metal hydrides are the most important parameters and their value determines the processes of absorption and desorption, as well as hysteresis. An experimental device has been created to study the processes of hydrogen extraction from the decomposition products of hydrogen sulfide and its compression at high pressures. A schematic diagram of a thermal sorption compressor device has been developed, which is suitable for use in industrial devices for compressing hydrogen obtained from the black sea hydrogen sulfide. The dependences of the mass fraction of hydrogen absorption in the separator sorber on the suspension temperature and its residence time in contact with the gas mixture at a pressure of 0.3 and 0.6 MPa are determined. The productivity of the process of extracting hydrogen from a gas mixture has been established. The dependences of the device productivity on the pressure of the mixture in the sorber and the pressure of hydrogen in the stripper and the temperature of the suspension are

---

<sup>1</sup> Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor at Department of Internal Combustion Engines, Plants and Operation, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Engineering Sciences, Lecturer at Department of Mechanical Engineering and Manufacturing Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine



established. The characteristics of hydrogen absorption at a suspension temperature of 298...313 K and in the pressure range 0.2...0.3 MPa are presented. The dynamics of the relative mass of hydrogen of the battery/compressor freed from high pressure was studied, depending on the heating temperature. The effectiveness of the metal hydride thermal sorption device for the extraction of hydrogen from the decomposition products of hydrogen sulfide is evaluated. It is determined that the energy efficiency of the experimental device increases with increasing pressure of the gas mixture in the sorption device. Indeed, the energy efficiency of the experimental device for extracting hydrogen from a gas mixture and compressing this hydrogen to high pressures is calculated.

### 1. Introduction

The Black Sea is the largest meromictic water basin on our planet, a characteristic feature of which is the presence of a relatively thin layer of aerobic waters and a powerful hydrogen sulfide zone ( $H_2S$  zone), which is located at depths of more than 90...160 m and occupies about 87% of the sea volume [1, p. 57]. Hydrogen sulfide is a high-calorie compound and can be used as an independent energy fuel. However, to date, hydrogen sulfide from the deep sea has not found such an application. In turn, the huge  $H_2S$  deposits in the Black Sea are a global source for producing hydrogen and sulfur. According to reports, the total amount of hydrogen sulfide is estimated at 40...50 billion tons. Only its annual growth is estimated at 0.01...0.1 million tons [2, p. 32]. The hydrogen sulfide content in the bottom layer of water varies from 0.3 to 10...12 mg/l. In sediments of the bottom, it ranges from 25 to 240 mg/l [2]. However, despite the presence of huge reserves in the Black Sea, the extraction of  $H_2S$  is associated with huge energy difficulties. These difficulties are primarily caused by the following factors [3, p. 26]: in sea water,  $H_2S$  is present not only in a free, but also in a bound state, as a part of hydrosulfites; the need to lift saturated deep hydrogen sulfide masses of sea water; the need to separate hydrogen sulfide from seawater; the need to extract hydrogen from the gas mixture formed during the decomposition of hydrogen sulfide.

One of the effective methods for solving the problem of extracting hydrogen from a gas mixture is the use of metal hydride technologies, allowing to obtain hydrogen of high purity and pressure. Metal hydrides

are capable of reacting with hydrogen and creating chemical compounds with a high content of atomic hydrogen. Some of these hydride-releasing compounds are reversible: they are able to absorb hydrogen during heat extraction and to release it when heat is supplied. These compounds are solid fine powders. An important fundamental property of these materials is the absorption of atomic hydrogen and insensitivity to the absorption of other gases. This property allows to create a device for the effective extraction of hydrogen from gas mixtures.

The unique properties of metal hydrides can be used in thermochemical cycles and devices for compressing hydrogen to high pressures [4, p. 38]. There are many devices that work using these properties, but they all have one significant drawback – the discrete (cyclic) principle of operation. This determines the low thermodynamic efficiency, extremely complex control system and the high cost of these devices, respectively.

Compression processes based on metal hydride technology and, accordingly, technical devices, can be effective only when a continuous process is implemented in these devices. Continuous operation of a thermal absorption compressor device can be realized using metal hydrides in the form of a suspension in an organic liquid. This allows to transport metal hydrides between the elements of the device, thereby increasing thermodynamic efficiency, significantly reducing the weight and dimensions and cost of the system.

## **2. Basic equations and dependences of physico-chemical properties of reversible metal hydrides and basic organic liquids**

The most important is the parametric dependence of the properties of metal hydrides: pressure – temperature – concentration. In this sense, the possibility of using the Van Hoff relations for the temperature dependence of the logarithm of the pressure of hydrogen sorption/desorption was investigated. The Van Hoff equation in accordance with the relations of chemical thermodynamics, with changes in temperature ( $T$ ), equilibrium constant ( $K$ ) is given in the change in the standard enthalpy ( $\Delta H$ ) for this process, has the following form [5, p. 21]:

$$\frac{d \ln K}{dT} = \frac{\Delta H}{RT^2}$$

If to take the reaction enthalpy at a variable temperature unchanged, then a certain interval of this differential equation for temperatures  $T_1$  and  $T_2$  has the form:

$$\ln\left(\frac{K_2}{K_1}\right) = \frac{-\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

In this equation,  $K_1$  is the equilibrium constant at absolute temperature  $T_1$  and  $K_2$  is the equilibrium constant at absolute temperature  $T_2$ .  $\Delta H$  is the standard enthalpy and  $R$  is the gas constant.

In this way

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S ;$$

and

$$\Delta G = -RT \ln K .$$

therefore

$$\ln K = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R} .$$

Thus, the graph of the natural logarithm of the equilibrium constant is displayed by a straight line. The slope of the line is equal to the ratio of the standard enthalpy in the gas constant  $\Delta H/R$  and the absolute temperature  $T$  with a minus sign and the ratio of the standard entropy in the gas constant  $\Delta S/R$  with a plus sign.

The differentiation of this equation leads to the Van Hoff equation [6, p. 62].

The Arrhenius equation determines the dependence of the equilibrium constant of a chemical reaction  $k$  on temperature  $T$  and activation energy  $E_a$ , as shown below:

$$k = Ae^{-E_a/RT} .$$

Here  $A$  is the coefficient of proportionality before the exponential function or, more simply, the pre-factor and  $R$  is the gas constant. The proportionality coefficient values are identical at a constant reaction rate and vary depending on the type of reaction. If a first-order reaction takes place, then the proportionality coefficient has a dimension of  $s^{-1}$ , in connection with this it is often called the frequency factor or the frequency of the reaction attempt. More simply,  $k$  is the number of collisions per second that leads to a reaction,  $A$  is the total number of collisions (which leads to a reaction or not) per second, and  $e^{-E_a/RT}$  is the probability that any collision will lead

to a reaction. When the activation energy is provided in molecular devices instead of mole devices, for example, Joule per molecule instead of Joule per mole, the Boltzmann constant is used instead of the gas constant. It should be noted that an increase in temperature or a decrease in activation energy leads to an increase in the reaction rate.

Molecular hydrogen under ordinary conditions – at pressures up to 100 MPa and temperatures 298...323 K – interacts only with a limited number of metals, but exclusively with metals that have a low ionization potential: alkali and rare-earth metals, etc.

The hydride formation enthalpy is an important parameter that characterizes a compound that can be used as sorbent for various applications. If the range of  $\Delta H$  values is in the range of 25...50 kJ×mol<sup>-1</sup>, then such a compound is suitable for use in devices for the compression and extraction of hydrogen.

The heat of formation of a stable reversible hydride compound is within 15...40 kJ×ml<sup>-1</sup>. When this heat is below 15 kJ×ml<sup>-1</sup>, the hydride compound is not stable enough to charge the metal hydrides at three ambient temperatures. On the other hand, the hydride compound is very resistant to desorption at ambient temperature when  $\Delta H$  exceeds 50 kJ×ml<sup>-1</sup>.

In general, the difference in standard entropy ( $\Delta S$ ) between the hydride-forming composition and the hydride (hysteresis) is small and amounts to about 10 kJ×ml<sup>-1</sup> × K<sup>-1</sup>.

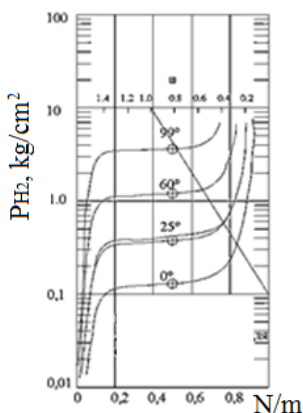
Changes in the entropy of hydride formation are primarily ensured by the loss of standard hydrogen entropy (130.858 J×ml<sup>-1</sup>×K<sup>-1</sup> at 298 K), which means that  $\Delta S$  can be accepted as a constant and independent of the nature of hydride-forming compounds.

Efficient hydrogen embedding and its compression to high pressures can be achieved by using metal hydride compounds of the type  $La Ni_{5-x} Al_x$  адо  $Mm Ni_{5-x} Al_x$ . The choice of such materials is due, firstly, to the fact that these materials provide a sufficiently high speed of the hydrogen sorption process at low pressures (0.15...0.25 MPa) and moderate temperatures (288...318 K) of the process, and make it possible to obtain relatively high hydrogen pressures at moderate temperatures (353...373 K). Such characteristics of hydride-releasing compounds make it possible to avoid, on the one hand, significant dissolution of associated gases ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $C_m H_n$ ) in a liquid organic carrier during the sorption of hydrogen from the

An analysis of the data presented in Figure 1 shows that the most effective should be considered hydride-releasing compounds, the properties of which lie within the compounds of the lantate, nickel and aluminum  $LaNi_{5}-LaNi_{4.5}Al_{0.5}$ .

The results of experimental studies indicate that the most appropriate is the use of intermetallic compound  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$  as a hydride-soluble compound.

249



**Figure 2. Isotherms of hydrogen absorption and desorption for the  $MnNi_{4.5}Al_{0.5}$  compound**

Figure 2 shows the experimentally obtained hydrogen absorption and desorption isotherms for the hydride-releasing compound  $MnNi_{4.5}Al_{0.5}$ . These data indicate that the absorption of hydrogen from the gas mixture can be effectively carried out at temperatures of 298...318 K, and the partial pressure of hydrogen in this case should be within 0.1 MPa. To ensure high rates of the sorption process, it is advisable to have a partial pressure of hydrogen at the level of 0.15 ... 0.25 MPa, which, on the one hand, will accelerate the speed of the process, and on the other, it will limit the solubility of associated gases ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$ ,  $C_mH_n$ ), which are present in the mixture upon decomposition of hydrogen sulfide.

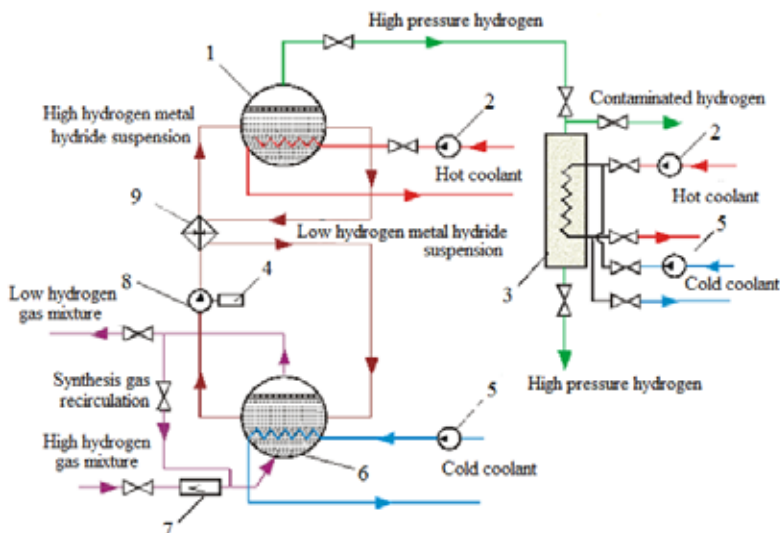
To reduce or eliminate the evolution of these gases, which are nevertheless dissolved in a liquid organic carrier, for the desorption of purified hydrogen, it is necessary to maintain the process temperature at the level of 363...383 K and ensure the extraction of high-purity hydrogen.

Further compression of hydrogen to pressures of 15...20 MPa can be achieved in discrete action using the same compound. However, taking into account the fact that the hydrogen that is supplied to the compression is free of associated gases, the process temperature can be raised to 523...573 K. This will provide a predetermined compression pressure within 15...20 MPa. The discrete principle of operation of a thermochemical hydride compressor allows the final purification of hydrogen from impurities of associated gases. The process is as follows. After the end of the sorption process in a thermochemical metal hydride compressor using a hot coolant (organic high-temperature liquid such as ПМС-200), the hydrogen pressure in this apparatus rises to 1.0...1.5 MPa. Next, the valve opens for the release of contaminated hydrogen into the candle, where it is burned. The release time of contaminated hydrogen is 3...5 s. After that, the temperature of the hot coolant rises to 523...573 K, providing the necessary hydrogen pressure in the range of 15...20 MPa. In this case, it is possible to achieve a hydrogen

purity of 99.9999, but in practice, taking into account the contamination of pipelines, fittings, etc., it is realistic to obtain hydrogen with a purity of 99.99.

### 3. Experimental device for hydrogen extraction from products of hydrogen sulfide decomposition and its compression at high pressures

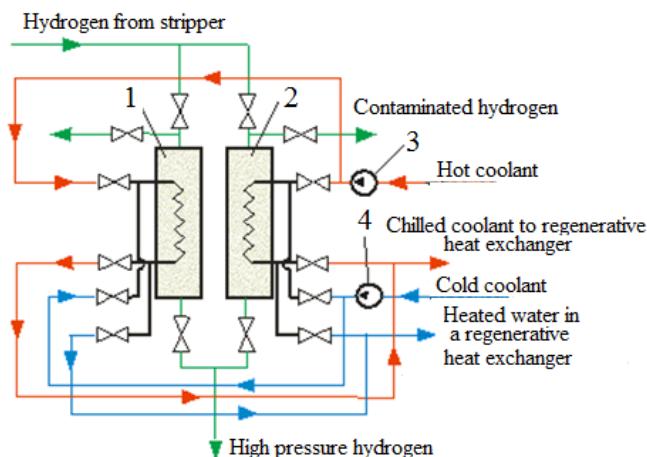
A schematic diagram of an experimental device for the hydrogen extraction from the decomposition products of hydrogen sulfide and its compression at high pressures is shown in Figure 3. Device works as follows. The gas mixture with a high volumetric hydrogen content (up to 72%) is supplied through the reducer 7 to the adsorber 6 where it is absorbed by the hydride-releasing composition  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ . In this case, the heat of the hydride formation reaction is removed by cold coolant, which is supplied by pump 5. Since not all hydrogen is absorbed by the hydride-releasing composition, part of it is supplied to recirculation, and the rest of the gas mixture with low hydrogen content is removed and can be used in a heat engine to generate electricity with the purpose of providing energy to the device.



**Figure 3. Scheme of an experimental device for the extraction of hydrogen from the decomposition products of hydrogen sulfide and its compression at high pressures**

Next, the suspension of metal hydrides  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}H_6$  is supplied through the membrane pump 8 through the heat exchanger-heater of the suspension 9 to the stripper 1. In order to desorb the purified hydrogen from the hydride, hot coolant with a temperature of 363 ... 383 K is supplied to this apparatus using pump 2 that provides a hydrogen pressure of 0.8...1.2 MPa. From stripper 1, purified hydrogen with the specified pressure enters the battery-compressor 3, where  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$  intermetallic compounds are absorbed. The heat of reaction is removed by means of a coolant using pump 5. After filling this apparatus with hydrogen, the valve is shut off, a hot fluid with a temperature of 323...353 K is supplied, providing a hydrogen pressure of 0.15...0.25 MPa. In this case, the corresponding valve opens and hydrogen is removed from the compressor battery with residual contaminants that could get into the hydrogen during degassing of the liquid organic carrier stripper 1. After purging, the valve closes and the temperature of the hot coolant rises to 523...573 K, providing hydrogen pressure of a level 15...20 MPa.

Figure 4 shows the final agreement on the concept of a thermal sorption compressor device, which is suitable for use in industrial devices for compressing hydrogen obtained from the Black Sea hydrogen sulfide to high pressures.



**Figure 4. Schematic diagram of a cyclic thermal sorption compressor for an industrial device: 1,4 – thermal sorption battery-compressor; 2 – hot coolant pump; 3 – cold coolant pump**



This circuit diagram is practically different in that it consists of two metal hydride compressor devices that operate cyclically and provide a continuous supply of high pressure hydrogen to the consumer.

Also, the technical solution is characterized in that the cold heat carrier, which is used to cool the apparatus of the compressor device, is not discharged into the environment, but used as an additional energy source for heating the hot heat carrier in front of the boiler. This additional measure does not significantly affect the fundamental decision, but allows to save up to 3.0 ... 3.5% of thermal energy. The structure of the device includes a certain number of heat exchangers designed for cooling and heating a suspension of hydride-releasing material, hydrogen and other liquids.

#### **4. The results of experimental studies of hydrogen extraction processes from the gas mixture formed during the hydrogen sulfide decomposition**

The decomposition products of hydrogen sulfide and related substances that were obtained from the deep layers of the Black Sea were modeled using a mixture whose composition can be determined with a certain error in Table 1.

Table 1

#### **Decomposition products of hydrogen sulfide**

<b>Product</b>	<b>Concentration, % (vol.)</b>
H <sub>2</sub>	71
SO <sub>2</sub>	4
SO <sub>3</sub>	3
CO <sub>2</sub>	2
N <sub>2</sub>	7
H <sub>2</sub> O steam	5
unbalance	8
Generally:	100

The experience of previous studies that were carried out to study the properties of hydride-releasing materials suggests that such an error does not have a noticeable effect on the operation of the hydrogen separator and the processes that occur in this apparatus. In addition, based on the actual operating conditions of the device for producing a gas mixture during the

decomposition of hydrogen sulfide, it can be expected that the composition of the mixture will be significantly dependent on the parameters of the decomposition process and will fluctuate over a fairly wide range.

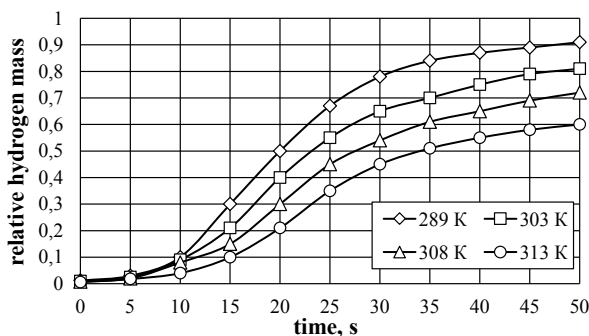
The suspension of hydride-releasing material consisted of 1 kg of  $LaNi_5$  intermetallic compound 2.5 kg of organosilicon liquid (PMS-5 polymethylsiloxane), the volume ratio was 1:10. This ratio was chosen on the basis of ensuring reliable formation of a suspension stable against delamination and the possibility of its transportation through the apparatuses of the experimental device without a sufficiently noticeable hydraulic resistance. The total volumetric amount of the circulating suspension was 2.75 liters, and its flow rate was 1.9 l/min. The residence time of a single volume of the suspension in the sorption and desorption apparatus is approximately 50 seconds.

Figure 5 shows the kinetic characteristics of the process of hydrogen absorption from the model mixture at a pressure of 0.3 MPa and a suspension temperature in the range 298 ... 313 K. The pressure in the sorbent at the level of 0.3 MPa ensures the minimum solubility of the accompanying gases contained in polymethylsiloxane mixtures and can stain the final product – high purity hydrogen.

During a stay in the sorbent, the maximum absorption rate corresponds to a minimum suspension temperature of 298 K. At the same time, for 50 seconds, a suspension of hydride-releasing material absorbs up to 90% of the maximum possible amount of hydrogen. Over the same period, at a temperature of 313 K, this suspension absorbs only 60% of hydrogen from the model mixture.

Under these operating conditions, it is quite difficult to ensure the temperature of the suspension in the sorbent at the level of 298 K, especially in the summer period, therefore, in practice, it is necessary to focus on the temperature range of 318...323 K, which is satisfactory enough for the process of extracting hydrogen from the gas mixture.

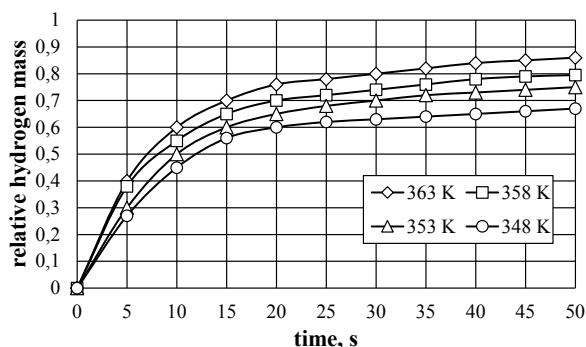
Such an increase in temperature will lead to a decrease in the efficiency of the device by 5...7% compared to theoretically possible. But, if try to provide a suspension temperature of 298 K due to additional cooling with the help of a refrigeration machine, then the overall efficiency of the device drops by 10...12%, which gives a loss compared to the previous case of 5%. Thus, the temperature range of 318...323 K is quite reasonable and acceptable for real operating conditions.



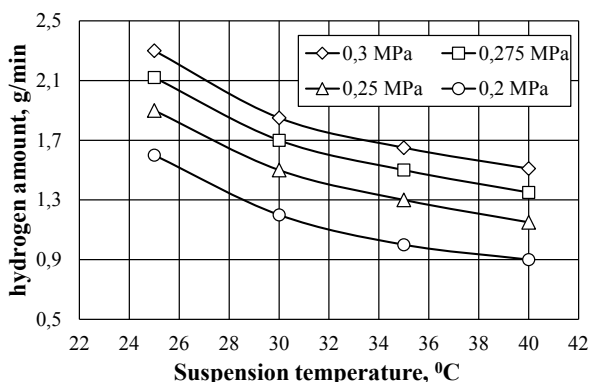
**Figure 5. Dependence of the mass fraction of hydrogen absorption in the separator sorber on the temperature of the suspension and the time of its stay in contact with the gas mixture at a pressure of 0.3 MPa**

Fig. 6 shows the kinetic characteristics of the process of hydrogen extraction from a suspension of hydride-releasing material at a pressure of 0.6 MPa and a suspension temperature in the stripper at a level of 348...363 K. The maximum temperature in the stripper is limited to 363 K, taking into account the following factors. Higher desorption temperatures in this apparatus will create conditions for the release of gases from the organic liquid that were dissolved in it upon contact with the gas mixture in the sorbent and, thus, pollute hydrogen. In addition, this temperature provides fire safety when working with polymethylsiloxane. At the same time spent in the stripper for 50 seconds, the suspension of hydride-releasing material emits up to 87% of the maximum amount of hydrogen that is contained in the suspension. For the same period at a temperature of 348 K, this suspension releases only 68% of hydrogen from a suspension of hydride-releasing material.

Along with studies of the kinetic characteristics of the experimental device, the productivity of the process of extracting hydrogen from a gas mixture was established. The dependences of the device productivity on the pressure of the mixture in the sorber and the pressure of hydrogen in the stripper and the temperature of the suspension, respectively, are established. Figure 7 shows the characteristics of hydrogen absorption at a suspension temperature of 298...313 K and in the pressure range 0.2...0.3 MPa.



**Figure 6. Dependence of the mass fraction of the withdrawn hydrogen in the stripper on the temperature of the suspension and its residence time at a pressure of 0.6 MPa**

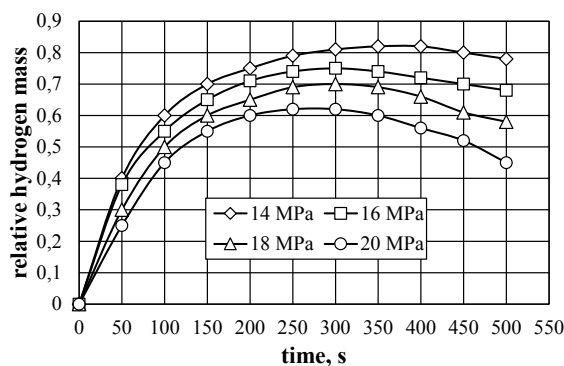


**Figure 7. Characteristics of the performance of hydrogen absorption in a sorber depending on the pressure of the gas mixture and the temperature of the suspension**

As experimental data show, the lowest hydrogen absorption rate at a gas mixture pressure of 0.2 MPa and a temperature of 313 K is 0.9 g/min. The maximum productivity of hydrogen absorption from the gas mixture reaches 2.3 g/min at a suspension temperature of 298 K in the stripper and a pressure of 0.3 MPa.

In terms of specific indicators, such characteristics of hydrogen absorption in a sorber fully comply with the requirements for systems for the separation of hydrogen from gas mixtures. These experimental data can be used without limitation in the design of pilot industrial and industrial samples of hydrogen absorption devices not only from gas mixtures obtained by decomposition of hydrogen sulfide, but other gas mixtures containing hydrogen. The amount of hydrogen in the mixture is not significant. Metal hydride thermochemical devices of this type can effectively absorb hydrogen at its concentration in the mixture, 5% by volume.

Figure 8 shows the results of a study of the performance characteristics (the amount of hydrogen released at a pressure of 20.0 MPa in time) of the bat-tery/compressor.

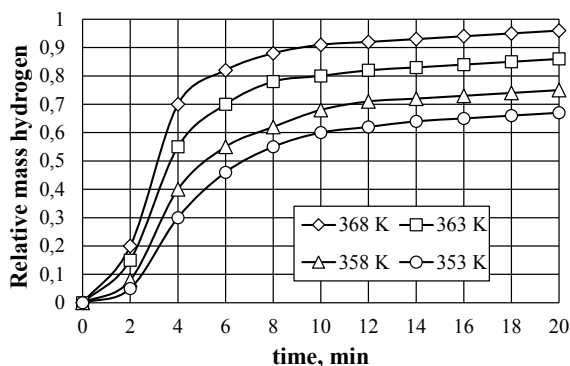


**Figure 8. Relative performance characteristics of the hydride battery/compressor depending on pressure and operating time**

The research results made it possible to establish a range of performance parameters of the hydride compressor on the pressure of hydrogen and the temperature of the hot coolant, which is the energy source for this compressor. So, the maximum compressor performance is achieved at a pressure of 14.0 MPa and a temperature of 473 K and is 5.8 g/min. Minimum productivity is 2.4 g/min at a pressure of 20.0 MPa and a temperature in the compressor of 398 K.

Figure 9 shows the relative performance characteristics of a hydride battery/compressor depending on temperature and operating time. Relative

performance is the ratio of the actual amount of hydrogen that is released over time from a metal hydride compressor at a given pressure and the maximum possible amount of hydrogen that can be released under ideal conditions.



**Figure 9. Experimental relative performance characteristics of the hydride bat-tery/compressor depending on pressure and operating time**

From the above results it follows that the actual performance of the metal hydride compressor is in a nonlinear dependence on the pressure and temperature of the compression process.

This performance in the studied range of pressures and temperatures under the most favorable conditions reaches 0.82 and can never reach 1.0, since it has a limitation that creates hydrogen pressure.

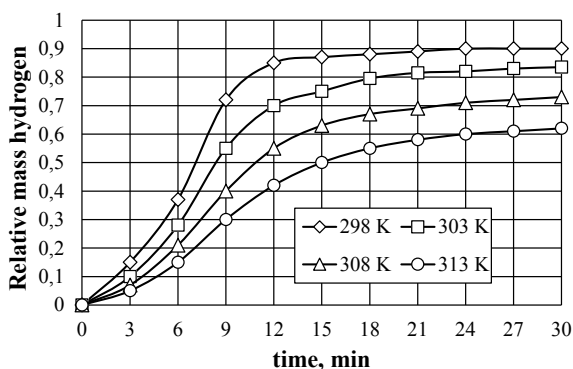
The data presented allows to make informed decisions when designing metal hydride compressors/batteries that are designed to compress hydrogen to high pressures.

One of the important characteristics is the dynamics of the evolution of hydrogen mass and its absorption in metal hydride batteries/compressors, depending on the heating and cooling temperatures. Dynamic characteristics determine the overall performance of the device and the thermodynamic efficiency of the entire system.

The dynamics of the relative mass of hydrogen released from the high pressure of the battery / compressor depending on the heating temperature is shown in Fig. 10. These data show that an increase in the heating temperature from 75 °C to 90°C makes it possible to isolate at high pressure 95%

hydrogen instead of 66.5% of the total volume that is stored in the device. The kinetics of this process increases, and the hydrogen yield increases from 0.041 l/min to 0.19 l/min, and the total hydrogen yield increases from 0.600 l to 0.905 l under the same conditions. At the 20th minute, the total hydrogen output increased from 0.665 l to 0.950 l under the same conditions.

The dynamics of the process of hydrogen absorption by sorbers is shown in Figure 10 and is characterized by the following data. A suspension of hydride-releasing material absorbs hydrogen very quickly if the temperature of the cooling water is minimal.



**Figure 10. Relative dependence of the mass fraction of absorbed hydrogen from temperature and time**

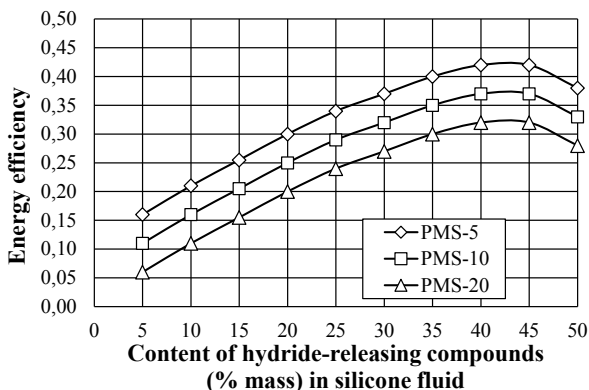
The total amount of hydrogen absorbed increased from 0.039 l to 0.15 l during the first 3 minutes, while the cooling water temperature decreased from 313 K to 298 K. At the 15th minute, the total hydrogen absorption increased from 0.505 l to 0.880 l under the same conditions. At the 30th minute, the total hydrogen uptake increased from 0.615 l to 0.725 l under the same conditions.

### 5. Evaluation of the effectiveness of metal hydride thermal sorption device for the hydrogen extraction from the decomposition products of hydrogen sulfide

The experimental device for the hydrogen extraction from synthetic gas and its further compression to high pressures is based on the use of a metal hydride thermochemical continuous cycle. A suspension of hydride-releas-

ing compound  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$  in PMS-5 silicone fluid was used as the working substance of the experimental device.

One of the most important factors that significantly affect the efficiency of the experimental device is the content of hydride-releasing material in the silicone fluid. The influence of this factor on the efficiency of the experimental device is shown in Figure 11.



**Figure 11. Influence of the content of hydride-releasing compounds in silicone fluid on the efficiency of the device**

Analysis of these data allows to state the following: an increase in the content of hydride-releasing material in the suspension increases the thermal efficiency of the experimental device for the extraction of hydrogen from the gas mixture and reduces the energy consumption for the operation of this device. This fact is explained by the fact that with an increase in the content of hydride-releasing compounds, the energy costs for heating the ballast silicone fluid are reduced, as well as the cost of its transportation.

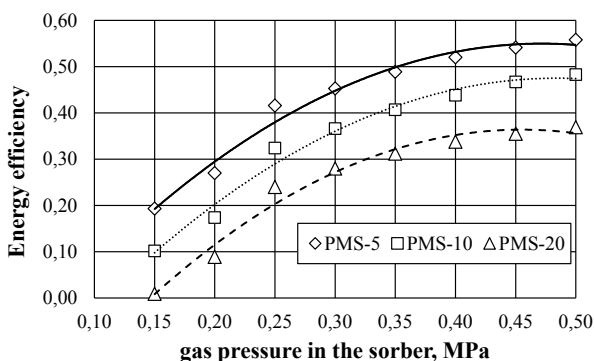
However, the ratio of hydride-releasing compound/silicone fluid should not exceed 0.45 (by mass) because when this ratio is increased above 0.45, the energy costs for transporting the suspension through heat and mass transfer devices, pipelines, and the like, connected in series are significantly increased.

The maximum energy efficiency of 38...42% can be achieved if the above ratio is 0.36 and PMS-5 silicone fluid is used as a carrier.



The next factor that significantly affects thermal efficiency is the viscosity of the silicone fluid. An increase in viscosity leads to a decrease in thermal efficiency, which significantly increases the hydrodynamic resistance and energy consumption for pumping the suspension through the apparatus and pipeline of the experimental device. This resistance is very significant due to the fact that the number of such devices connected in series is quite large. Thus, if the viscosity of the silicone fluid changes from 5 cSt to 20 cSt, the energy efficiency of the experimental device decreases from 0.16 to 0.06 and from 0.36 to 0.28 in accordance with the content of hydride-releasing compounds in the silicone fluid of the suspension.

The pressure of the synthesis gas in the sorber also has a significant effect on the thermal efficiency of the experimental device. This effect depends on the pressure of the synthesis gas and the viscosity of the silicone fluid used as a carrier, shown in Figure 12. Calculations and tests were performed under conditions of using a suspension with a 40% content of hydride-releasing material.



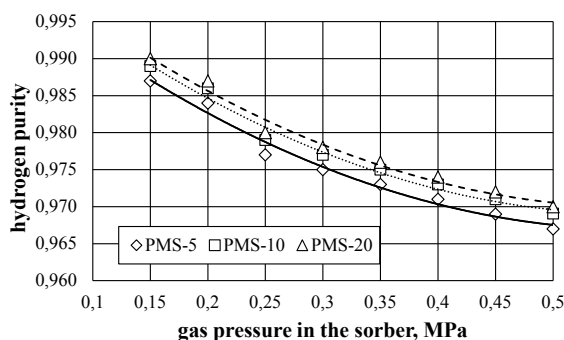
**Figure 12. The effect of the pressure of the gas mixture in the sorbent on the device efficiency**

An analysis of these data allows to state the following: the energy efficiency of the experimental device increases with increasing pressure of the gas mixture in the device sorber. These dependencies are almost linear. Increasing viscosity negatively affects energy efficiency. So, for example, if the pressure in the installation sorbent is 0.15 MPa, and the viscosity of the suspension is 20 cSt, the energy efficiency is only 0.009 (0.9%); if the

pressure of the gas mixture in the sorber is 0.5 MPa and the viscosity of the suspension is 5 cSt, the energy efficiency reaches 0.558 (55.8%).

Unfortunately, an increase in the pressure of the gas mixture in the sorbent is partly due to the negative effect on the overall efficiency of the experimental device. The fact is that increasing the pressure of the gas mixture in the sorbent leads to an increase in the contamination of the silicone fluid with harmful substances present in the gas mixture (carbon monoxide, hydrocarbon gases, etc.). These harmful gases dissolve in the silicone fluid, followed by release in the stripper and pollute the hydrogen, stripped from the hydride. The dependences of hydrogen purity at the outlet of the stripper of the experimental device are shown in Figure 13.

An analysis of these data shows that if it is necessary to obtain high-purity hydrogen, then the pressure of the gas mixture in the sorbing device should be in the range 0.15...0.25 MPa, however, the energy efficiency of the installation is less than 0.33 and depends on the viscosity of the silicone fluid, as can be seen in Fig. 13. The pressure of the gas mixture in the sorber can be maintained in the range of 0.25...0.5 MPa, if the purity of the hydrogen produced by the experimental device is not critical. In this case, the energy efficiency of the device reaches 0.56.

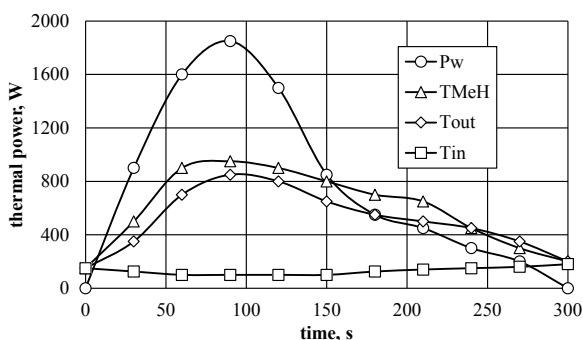


**Figure 13. Effect of the pressure of the gas mixture in the sorbent on the hydrogen purity of the device**

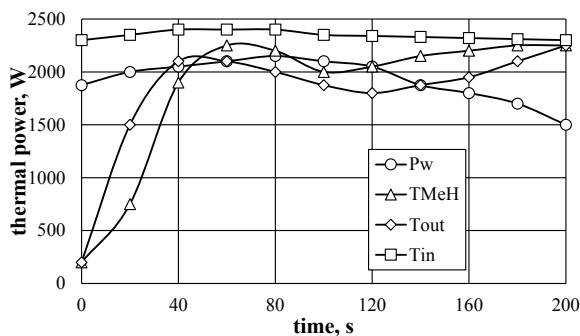
In any case, the choice of pressure in the device sorbent is a compromise solution and is one of the main tasks in the rational design of equipment for the extraction of hydrogen from gas mixtures.

## 6. Evaluation of the effectiveness of metal hydride thermal sorption device compressing hydrogen to high pressures

The metal hydride thermal sorption compressor of the device operates on a discrete principle of operation. The energy efficiency of the device depends on numerous factors, such as the duration of the cycle, the temperature level of energy carriers and their distribution over time. These parameters determine the energy consumption for the process and the overall energy efficiency of the experimental device as a whole. The influence of the most important parameters is shown in Figure 14 a.



a



b

Figure 14. Thermal efficiency of a metal hydride experimental device for hydrogen compression

The initial conditions that were established during these studies are as follows: hydride-releasing material  $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$  in an amount of 4.5 kg; the temperature of the coolant (cooling water) is 298 K, which did not change throughout the experiment.

An analysis of the results of the experiment shows that the thermal power that is removed from the sorber during the working half-cycle is maximum at the 90th second and reaches 1890 W. The maximum temperature of hydride-releasing compounds reaches 58°C due to the fact that the kinetics of sorption (the amount of hydrogen absorbed over time) and the total amount of heat of reaction are the largest at present. The temperature of the coolant (cold coolant) is 53°C. After this time, the hydride-releasing compound absorbed about 65% of its maximum capacity and the kinetics of sorption is significantly reduced. The amount of heat, the temperature of the hydride-releasing compound and the cooling water are reduced accordingly.

At the 300th second, the process of sorption (extraction) of hydrogen is almost complete. The hydride-releasing compound is completely saturated with hydrogen and is ready for the next half-cycle of hydrogen desorption (compression).

The effectiveness of this half-cycle depends on the same factors as those indicated above: the duration of the cycle is the temperature level of energy carriers and their distribution over time. These parameters also determine the energy consumption and efficiency of the experimental device as a whole. The influence of these most important parameters is presented in Figure 14 b. The initial conditions of the experiment are as follows: the temperature of the hot heat carrier (water) at the inlet to the stripper (compressor) is 81.6°C and practically does not change during the research.

An analysis of these results shows that the thermal power is supplied to the hydride-releasing compounds of the stripper during the entire half-cycle, approximately constant, but its maximum values are in the range between 40...100 seconds and reach 2250 W.

The maximum hydride temperature reaches 80.5°C, due to the fact that the kinetics (the amount of hydrogen stripped over time) and the total amount of absorbed heat of the reaction are the largest at this time. The temperature of the hot fluid at the outlet of the stripper (compressor) is 75°C.

After such heating of hydride-releasing compound is sorbed up to 85% hydrogen from its maximum capacity and the kinetics of desorption

are significantly reduced. The amount of heat, the temperature of the hydride-releasing compound and the hot coolant at the outlet of the stripper (compressor) increase accordingly. At the 200th second, the process of hydrogen desorption (compression) is almost complete. The hydride-releasing compound is completely free of hydrogen and is ready for the start of the next half-cycle – sorption (extraction) of hydrogen from the gas mixture.

The overall energy efficiency of the experimental device consists of the per-formance indicators of individual elements, such as a sorber, stripper, heat exchangers, liquid energy pumps, coolants, cooling agents, and other devices that are necessary for the device operation. Thus, the energy efficiency of the experimental device can be found as a complex of multiplication of all elements and auxiliary equipment that ensures the operation of the experimental device:

$$\eta_{\text{ex}} = \eta_{\text{sorber}} \times \eta_{\text{stripper}} \times \eta_{\text{heater 1}} \times \eta_{\text{heater 2}} \times \dots \times \eta_{\text{heater n}} \times \eta_{\text{cooler 1}} \times \eta_{\text{cooler 2}} \times \dots \times \eta_{\text{heater}}$$

It is very difficult to calculate theoretically the effectiveness of the experi-mental device because it is a problem with many unknown quantities. The easiest and most accurate way to determine this efficiency is experimentally. The real energy efficiency of the experimental device for extracting hydrogen from a gas mixture and compressing this hydrogen to high pressures is presented in Table 2.

Table 2

**Energy efficiency of a hydrogen extraction experimental device**

Parameter	Dimension	Value
Energy consumption for removing hydrogen in a sorber	(KW×h)/kg H <sub>2</sub>	1,22
Energy consumption for hydrogen evolution in the stripper	(KW×h)/kg H <sub>2</sub>	14,93
Energy consumption for sorption of hydrogen from a stripper of a hydrogen recovery device; a sorber of a hydrogen compression device	(KW×h)/kg H <sub>2</sub>	1,87
Energy consumption for hydrogen removal (compression up to 15 MPa) from hydride in the stripper of the compressor device	(KW×h)/kg H <sub>2</sub>	21,08
The total energy consumption of a device for extracting hydrogen from a gas mixture and compressing this hydrogen to 15 MPa	(KW×h)/kg H <sub>2</sub>	39,10

The initial conditions of the experiment are as follows:

1. The liquid carrier is polymethylsiloxane PMS-10 with a viscosity of 10 cSt.
2. The content of hydride-releasing material in the suspension is 30% (mass).
3. The temperature of the hot fluid at the inlet (water) is 85°C.
4. The temperature of the cooling water is 22°C.
5. The productivity of the device for compressed hydrogen (15.2 MPa) is 63 g/h.

Such a sense of energy efficiency can be significantly improved in the design of an industrial device. This is entirely possible because full-sized industrial equipment will have higher efficiency and performance. The experimental device consists of samples of equipment of reduced size, which have significantly worse efficiency compared to industrial designs. In addition, industrial equipment and the device as a whole will have relatively small losses of energy in the environment, which also increases its efficiency.

## 7. Conclusions

1. The experimental data allow to conclude that the developed devices can be used to study the processes of hydrogen extraction from a gas mixture formed during the decomposition of hydrogen sulfide using metal hydride technologies.

2. Experimental studies have confirmed the feasibility and effectiveness of metal hydride technologies, and also with sufficient accuracy allowed to obtain the nature of changes in the main parameters of the process of hydrogen extraction from a gas mixture. The kinetic characteristics of the experimental device were studied and the performance of the process of extracting hydrogen from the gas mixture was established. The lowest productivity of hydrogen absorption is at a pressure of a gas mixture of 0.2 MPa and a temperature of 313 K – 0.9 g/min. The maximum productivity of hydrogen absorption from the gas mixture reaches 2.3 g/min at a suspension temperature of 298 K in the stripper and a pressure of 0.3 MPa.

3. The dynamics of the relative mass of hydrogen freed from high pressure battery/compressor depending on the heating temperature. Raising the heating temperature from 75°C to 90°C allows the release of 95% hydrogen at high

pressure. A suspension of hydride-releasing material absorbs hydrogen very quickly if the temperature of the cooling water is minimal.

4. The increase in the content of hydride-releasing material in the suspension increases the thermal efficiency of the experimental device for the extraction of hydrogen from the gas mixture and reduces the energy consumption for the operation of this device. With an increase in the content of hydride-releasing compounds, the energy costs for heating the ballast silicone fluid decrease, as well as the cost of its transportation.

### References:

1. Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine (2002). *Stan dovkillja Chornogho morja* [The state of the environment of the Black Sea]. Odesa: Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. (in Ukrainian)

2. Dimitrov D., Dimitrov P. (2010). Chernoe more – netraditsionnyy energeticheskiy i syr'evoy tsentr Evropy [The Black Sea is an unconventional energy and raw material center of Europe]. *Geology and mineral resources of the Oceans*, vol. 2, pp. 27–34.

3. Neklyudov I.M., Borts B.V., Polevich O.V., Tkachenko V.I., Shilyaev B.A. (2006). Al'ternativnaya serovodorodnaya energetika Chernogo morya, sostoyanie, problemy i perspektivy. Chast' I [Alternative hydrogen sulphide energy of the Black Sea, state, problems and prospects. Part I]. *Hydrogen Energy and Transport*, vol. 12(44), pp. 23–30.

4. Tarasov B.P., Lototskiy M.V., Yartys' V.Ya. (2006). Problema khraneniya vodoroda i perspektivy ispol'zovaniya gidridov dlya akkumulirovaniya vodoroda [The problem of hydrogen storage and the prospects for using hydrides for hydrogen storage]. *Russian Chemical Journal*, vol. L, no. 6, pp. 34–48.

5. Kolachev B.A., Shalin R.E., Il'in A.A. (1995). *Splavy-nakopiteli vodoroda: Spravochnik* [Hydrogen Storage Alloys: A Guide]. Moscow: Metalurgiya. (in Russian)

6. Broom D. (2011). Hydrogen Storage Materials / The Characterisation of Their Storage Properties. Springer.

**ASSESSMENT OF THE LEARNING PROCESS RISKS AT  
HIGHER EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN ACCORDANCE  
WITH THE DSTU ISO 31010: 2013 REQUIREMENTS**

**ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ ОСВІТЬОГО ПРОЦЕСУ ЗВО  
ЗГІДНО З ВИМОГАМИ ДСТУ ISO 31010:2013**

**Ganna Khimicheva<sup>1</sup>**

**Antonina Volivach<sup>2</sup>**

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-61>

**Abstract.** *The object of the study* is to improve the process of identification and assessment of higher education institutions risks according to the requirements of DSTU ISO 31010:2013. *The subject of the study* is to select and substantiate mechanisms and tools for the educational process risks assessment according to the requirements of DSTU ISO 31010:2013. *The methodological basis of the research* is a systematic approach to the study of the research object. Experimental studies have been conducted using peer-review methods in the real world of higher education institutions. *The purpose of the study* is to select and substantiate methods, principles and approaches to identify risks in the educational process of higher education institutions, in accordance with the requirements of DSTU ISO 31010:2013. This article presents the research results on the possibility and expediency of applying the DSTU ISO 31010:2013 “Risk Management. General Risk Assessment Methods” requirements to identify and analyze the potential risks of the educational process. A special four-step algorithm has been developed to evaluate the risks of the educational process, which allows assessing the risks of this process at all stages of its life cycle. The mechanism is based on a systematic approach, principles of general quality management (TQM),

---

<sup>1</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies and Measuring Technique, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

<sup>2</sup> Senior Lecturer of the Department of Computer-Integrated Technologies and Measuring Technique, Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine



risk management and requirements of the standard DSTU ISO 31010: 2013. For practical implementation of this algorithm, the paper provides methodological recommendations concerning the general risk assessment (identification, qualitative analysis and quantitative assessment). In particular, the requirements for the expert working group formation have been outlined; external and internal environment have been defined, without which there can be no educational process; material resources have been given; a tree of properties of qualitative specialist training has been built; the methods of risk identification have been substantiated and the following have been considered: "Brainstorming", "Delphi" method, "Hazardous Factors Analysis and Critical Control Points (HACCP)", and SWOT analysis; it has been found out that the choice of identification method depends on the educational process specifics and is the prerogative of higher education institution; the classification of the educational process risks in the form of a three-level structure, the essence of which is to establish relationships between the levels and to determine the factors of their impact; the expert method has identified six groups of major risks of educational process and provides single indicators for their evaluation; a qualitative and quantitative analysis of potential risks have been conducted using the mapping method and the possibility of risks and the level of their consequences have been determined; the most risky areas of the educational process have been identified, which requires special attention, development and implementation of actions to reduce them; an action plan for minimizing potential risks has been outlined. The prospects for further research are related to a more detailed study of the educational process risks, in particular the impact of their economic component on the higher education institutions activities.

### 1. Вступ

Ринок праці все більше залежить від набутих професійних навичок спеціалістів, з однієї сторони та більш жорстких вимог роботодавців до випускників закладів вищої освіти з іншої. Національна економіка країн потребує підготовки висококваліфікованих фахівців. Проте, в сучасних умовах діяльність закладів вищої освіти (ЗВО), як і будь-якої організації (установи) пов'язана з ризиками.

Питаннями діяльності ЗВО, в тому числі й оцінюванням їх ризиків займалися ряд вітчизняних і закордонних науковців, а саме: Прой-

дак Ю.С., Гаман П.І., Ревенко О.О., Должанський А.М., Донець О.М., Урецька Ю.І., Родіонова Н.Ф., Заярна І.Я., Альжанова Н.Ш. та інші.

Міжнародною організацією зі стандартизації для прогнозування та запобігання ризиків розроблена ціла серія стандартів ISO 31000. Дані стандарти є універсальним інструментом управління ризиками для прийняття рішень, формування стратегічних цілей спрямованих на зменшення ризиків та підвищення конкурентоспроможності будь-якої організації (установи), в тому числі і ЗВО.

Тому дослідження пов'язані з оцінюванням ризиків освітнього процесу ЗВО є своєчасними і актуальними.

**Об'єктом дослідження** є вдосконалення процесу ідентифікації та оцінки ризиків закладів вищої освіти за вимогами стандарту ДСТУ ISO 31010:2013.

**Предметом дослідження** є вибір та обґрунтування механізмів й інструментів оцінювання ризиків освітнього процесу за вимогами стандарту ДСТУ ISO 31010:2013.

**Методологічною основою досліджень** є системний підхід до вивчення об'єкта досліджень. Експериментальні дослідження проводились за допомогою методів експертних оцінок в реальних умовах закладів вищої освіти.

**Метою дослідження** є вибір і обґрунтування методів, принципів і підходів до ідентифікації ризиків освітнього процесу закладів вищої освіти, згідно з вимогами стандарту ДСТУ ISO 31010:2013.

**Основне завдання** даного дослідження полягає у побудові алгоритму оцінювання ризиків освітнього процесу ЗВО. Для цього в роботі було сформовано робочу групу експертів, визначено зовнішнє та внутрішнє середовище, яке обумовлює ризики освітньої діяльності. Зокрема побудовано дерево властивостей якісного фахівця, вибрано й обґрунтовано методи ідентифікації ризиків. За допомогою методу картографування проведено якісний та кількісний аналіз ризиків та запропоновано комплекс організаційно-технічних заходів по їх зменшенню.

## 2. Результати експериментальних досліджень

Одним із важливих етапів управління ризиками для організацій, підприємств, установ зокрема закладів вищої освіти є їх оцінка. Згідно з [1; 2] оцінка ризиків узагальнює процес ідентифікації, аналізу та їх

подальше оцінювання. Проте, для вірогідного, об'єктивного й своєчасного виявлення ризиків будь-якого об'єкту, у нашому випадку освітнього процесу ЗВО, потрібно мати якісну інформацію, яка надавала б всебічне уявлення про фактори (чинники) їх виникнення, з метою їх мінімізації. Ефективним механізмом управління ризиками освітнього процесу є застосування міжнародного стандарту ДСТУ ISO 31010:2013 «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику». Даний стандарт є універсальним, передбачає логічні, науково обґрунтовані підходи щодо управління та загального оцінювання ризиків, допомагає приймати ефективні рішення в умовах невизначеності [3].

В ході досліджень для оцінювання впливу ризиків на освітній процес було розроблено спеціальний механізм (рис. 1), який дозволяє виявляти та корегувати ризики на усіх етапах життєвого циклу. Даний механізм складається з чотирьох етапів.

Розглянемо більш детально кожен з них. Так на **першому етапі** необхідно сформувати робочу групу. Основні вимоги до якої та алгоритм відбору експертів наведено у роботі [4], а перелік критеріїв в таблиці 1.

Таблиця 1

**Перелік критеріїв відбору експертів**

Критерії відбору (К)		
Відповідна кваліфікація	Науковий ступінь	K1
	Вчене звання	K2
Стаж роботи		K3
Наявність публікацій за напрямом оцінювання за останні 5-ть років		K4
Участь в експертних групах за об'єктом дослідження за останні 5-ть років		K5

Перелічені критерії дають можливість оцінити та визначити компетентність потенційних учасників експертної групи.

Варто зазначити, що дана група є постійно діючою, від якості її роботи залежить повнота та вірогідність інформації стосовно впливу ризиків на освітній процес. Експертна група в ході роботи забезпечує консультації з питань виявлення ризиків та розроблення організаційно-технічних заходів щодо зменшення їх впливу на освітній процес.

На **другому етапі**, визначаються зовнішнє та внутрішнє оточення. У роботі [5] авторами запропоновано структурувати зовнішні фактори

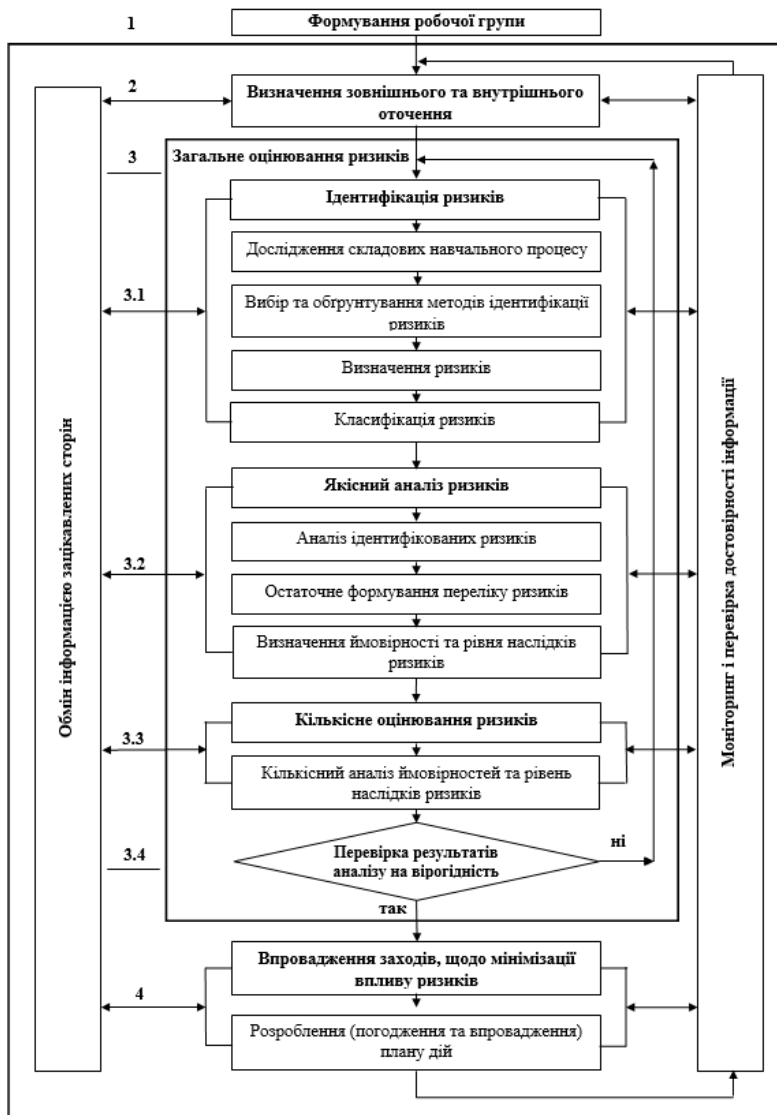


Рис. 1. Алгоритм оцінювання ризиків освітнього процесу ЗВО згідно ДСТУ ISO 31010:2013

впливу на два рівні: макросередовище та мікросередовище. До першого рівня (макросередовища) було віднесено такі фактори, як політичні, економічні та соціальні. В роботі [6] на прикладі Київського національного університету технологій та дизайну (КНУТД), за допомогою Pest-аналізу авторами було визначено найбільш суттєві фактори даного середовища.

Серед політичних факторів було виділено наступні: постійне удосконалення державної політики в освітній галузі; фінансування сфери освіти за залишковим принципом; політична ситуація в країні; інтеграція у європейський простір; зменшення кількості місць за бюджетним замовленням тощо.

Серед економічних факторів це: кризові явища та інфляція в економіці країни; посилення конкуренції на ринку надання освітніх послуг; впровадження рейтингового оцінювання ЗВО; потреба роботодавців у кваліфікованих фахівцях; регіональне розташування ЗВО.

Серед соціальних факторів: високий рівень безробіття та низький рівень матеріального забезпечення населення; міграція; недостатня кількість на ринку праці фахівців з інженерно-технічних спеціальностей та надлишок фахівців гуманітарних спеціальностей; низький рівень підготовки абітурієнтів.

Проте, слід зазначити, що для освітнього процесу найбільш вагомим є другий рівень (мікросередовище), яке обумовлюється вимогами: споживачів освітніх послуг, роботодавців, умовами ринку праці, тобто суттєво впливає на конкурентоспроможність ЗВО в цілому. Дане середовище формується шляхом здобувачів вищої освіти, батьків, студентського самоврядування, науково-педагогічних та наукових працівників, вимог: випускових кафедр, деканатів, вченої ради та керівництва ЗВО, оточення без якого не може існувати освітній процес.

Для функціонування кожного з наведених вище середовищ потрібно мати відповідні матеріальні ресурси. Так наприклад, для освітнього процесу матеріальними ресурсами є: кадрове забезпечення науково-педагогічних працівників, що враховує компетентність, вчене звання (професор, доцент), науковий ступінь (доктор наук, кандидат наук, доктор філософії, магістр), стаж роботи за профілем в зазначених межах (від 1 до 5, від 5 до 10, від 10 до 20, від 20 до 30, від 30 і більше років), наявність публікацій (підручники, навчальні посібники, монографії), статті у наукометричних базах: Scopus, Web of science core Collection; рецен-

зованих фахових виданнях (міжнародних і вітчизняних), навчально-методичне забезпечення освітньої програми (навчальні та робочі плани, навчальні та робочі програми дисциплін, конспекти лекцій, методичні розробки для лабораторних та практичних занять, пакет контрольних завдань з дисциплін, контроль знань (залік, екзамен, державний іспит / дипломна робота); матеріально-технічне забезпечення (лекційні аудиторії з інноваційним обладнанням, навчальні професійно-орієнтовані лабораторії з використанням інформаційних технологій і програмного забезпечення, комп'ютерні класи) та наукова діяльність, яка є інноваційною складовою освітнього процесу і включає: наукові дослідження в рамках держбюджетних робіт, госпдоговірні теми, ініціативні теми, договори про творчу співпрацю, конференції різних рівнів (міжнародні, всеукраїнські, інтернет-конференції, онлайн-конференції), круглі столи, стартапи, бізнес-інкубатори.

Дерево властивостей матеріальних ресурсів, яке враховує усі наведені вище складові, що впливають на ефективне проведення освітнього процесу і підготовку якісного фахівця наведено на рис. 2.

На наш погляд найбільш суттєвим є **третій етап**, який відповідає за загальне оцінювання ризиків (рис. 1). Він складається з чотирьох підетапів. Де 3.1 – ідентифікація ризиків; 3.2 – якісний аналіз ризиків; 3.3 – кількісне оцінювання ризиків та 3.4 – перевірка результатів аналізу на вірогідність.

Виконання усіх підетапів проводиться відповідно до пункту 4.3.4 стандарту [3]. Зокрема проведення робіт складається з визначення впливу негативних факторів на освітній процес, шляхом застосування методів структурованого аналізу.

Відомо, що базовим елементом ризик-менеджменту є ідентифікація ризиків (підетап 3.1). Як видно з рис. 1, основними процедурами ідентифікації є дослідження складових освітнього процесу; вибір та обґрунтування методів ідентифікації ризиків; визначення ризиків та їх класифікація. Виконання наведених вище процедур дозволяє виявити джерела ризику, ризикові дії, з'ясувати причини їх виникнення та оцінити наслідки негативного впливу на освітній процес.

Ідентифікація передбачає вивчення, збір та аналіз інформації щодо освітнього процесу і його складових, дослідження факторів впливу та визначення причин, джерел і характеру їх виникнення. Крім того, на даному підетапі особливу увагу потрібно приділяти процедурі вибору та обґрунту-

вання методів, які дозволяють ідентифікувати ризики. Дана процедура безпосередньо впливає на вірогідність та якість результатів досліджень.

Стандарт [3] рекомендує для ідентифікації ризиків в різних галузях національної економіки застосовувати 15 основних методів. Проте, в ході досліджень було встановлено, що для освітнього процесу найбільш придатними є три методи: «Мозковий штурм», метод «Делфі» та «Аналіз небезпечних чинників і критичні точки контролю (НАССР)». Розглянемо більш детально кожен з них.

Практичний досвід доводить, що одним з найбільш розповсюджених методів ідентифікації є метод «Мозковий штурм», який базується на висловлюваних ідеях усіх учасників експертної групи. Його суть полягає в тому, що в результаті групового обговорення та дискусій робочою групою визначаються чинники та ризики, з яких надалі складається перелік усіх можливих ризиків (які на думку експертів є важливими).

Даний метод доцільно використовувати для оцінювання ризиків на будь-якому етапі життєвого циклу освітнього процесу. Перевагою методу є результативне координування, яке застосовується на початковому етапі і є основою стимулювання експертів до обговорення та спрямування їх уваги на найбільш ризиковані аспекти освітнього процесу.

Метод «Мозковий штурм» може застосовуватись у двох видах формалізованому і неформалізованому. Формалізований – передбачає заздалегідь підготовлену стратегію обговорення, тобто є більш структурованим, за рахунок визначення мети і завдань проведення засідання та методів оцінювання, які будуть застосовуватись для об'єкта досліджень. Дані пункти потрібно визначити до початку роботи експертної групи. Неформалізований – залежить від ситуації тому є менш структурованим.

До переваг даного методу слід віднести: прийняття оригінальних рішень робочої групи, за рахунок творчого мислення. Це досягається шляхом залучення зацікавлених сторін, загального обміну інформацією, швидкого та легкого запровадження. Недоліками є великі витрати часу координатором на збір інформації (результатів думок експертів) та домінування ідей одних учасників групи над іншими, що надалі потребує розроблення окремих процедур для урівноваження результатів досліджень [3].

Наступний – метод «Делфі». В його основу покладено незалежні експертні оцінки. Суть даного методу полягає у незалежному опитуванні експертів робочої групи та перевірці узгодженості їх думок. На

Кадрове забезпечення (компетентність НПП)	Вчене звання	Професор
		Докент
	Науковий ступінь	Доктор наук
		Кандидат наук
		Доктор філософії
		Magistr
	Стаж роботи за профілем	Від 1 до 5 років
		Від 5 до 10 років
		Від 10 до 20 років
		Від 20 до 30 років
		Від 30 і більше
	Публікації	Ціліруччя
		Навчальні посібники
		Монографії
Якість методології освітнього процесу		Наукові статті у журналах
		Scopus
		Web of science core Collection
		Міжнародні видання
		Вітчизняні фахові видання
	Навчальні та робочі плани	Навчальні програми дисциплін
		Робочі програми дисциплін
		Конспекти лекцій
		Навчально-методичне



(інтегрована якість освітнього процесу)	забезпечення освітньої програми	Методичні розробки	
		Пакет контрольних запитань з дисциплін	
		Контроль знань	Залік
Матеріально-технічне забезпечення			Екзамен
			Державний іспит /
			Дипломна робота
		Лекційні аудиторії з інноваційним обладнанням	
		Навчальні проф-орієнтовані лабораторії з використанням ІІ та ІІЗ	
		Комп'ютерні класи	
Наукова діяльність			Держбюджетні роботи
		Наукові дослідження	Господарстві теми
			Ініціативні теми
			Договори про творчу співпрацю
			Міжнародні
			Всеукраїнські
		Конференції різних рівнів	Інтернет-конференції
			Онлайн-конференції
			Вебінари
		Круглі столи	
		Стартапи	
		Бізнес-інкубатори	

Рис. 2. Дерево властивостей підготовки якісного фахівця

відміну від наведеного вище методу учасники групи не знайомі один з одним, висловлюють свої думки індивідуально й анонімно, заповнюючи для цього спеціально розроблені анкети, які надалі обробляються за допомогою статистичних методів. Результати анкетування повідомляються усім учасникам групи. Для підвищення вірогідності результатів оцінювання передбачено зворотний зв'язок, який відбувається шляхом проведення декількох турів анкетування. При цьому слід зазначити, що до експертів встановлюються певні вимоги, зокрема, вони повинні бути добре поінформованими про об'єкт дослідження (у нашому випадку освітній процес), в анкетах відповідати обґрунтовано, тобто проводити якісне і кількісне оцінювання ризиків.

Перевагами даного методу є анонімність, відсутність впливу на думку окремого експерта, можливість роботи групи в різних місцях. Недоліком є досить великі затрати часу на його проведення.

Також, одним із запропонованих стандартом [3] методів є «Аналіз небезпечних чинників і критичні точки контролю (НАССР)», який на даний час найбільш широко застосовується в харчовій промисловості. Використання даного методу дозволяє ідентифікувати небезпечні чинники, запроваджувати засоби контролю, з метою запобігання їх впливу, що підвищує якість, надійність та безпечність надання будь-яких послуг, у тому числі й освітніх. Таким чином, метод спрямований на мінімізацію ризиків на усіх етапах життєвого циклу продукції (послуг). Для цього, згідно з вимогами стандарту [3] проводяться відповідні процедури, які документуються у вигляді протоколів, аналізу і плану роботи НАССР.

Перевагами даного методу є можливість отримувати задокументовані докази, які дозволяють надалі ідентифікувати та мінімізувати ризики, шляхом розробки контрольних листів, рекомендацій та організаційно-технічних заходів тощо. До недоліків слід віднести досить великі кадрові, економічні й часові затрати, у порівнянні з вище наведеними методами.

Проведені дослідження, які авторами викладені у роботі [7], довели, що крім наведених вище трьох методів для оцінювання ризиків освітньої діяльності доцільно застосовувати також широко відомий інструмент – SWOT-аналіз. Даний універсальний інструмент був апробований на прикладі КНУТД. Застосування даного інструменту дозволило оцінити зовнішнє та внутрішнє середовище, а також визначити можливості і загрози закладу, зокрема проведення ним освітнього процесу.

Згідно з результатами дослідження для КНУТД було запропоновано чотири стратегії розвитку. При цьому однією з ефективних було визнано стратегію порівняння сильних сторін та можливостей, яка спрямована на інтеграцію ЗВО у європейський простір вищої освіти та отримання вищих позицій в національних і міжнародних рейтингових оцінюваннях. Дотримання даної стратегії забезпечує закладу вищої освіти випуск більш якісного спеціаліста та задовольняє потреби роботодавців, як в країні, так і за її межами.

Крім того було встановлено, що особливу увагу потрібно приділяти стратегії слабких сторін і загроз. Оскільки дана стратегія повинна враховувати і передбачати потенційні ризики ЗВО.

Отже, як видно з вище наведеного, перелічені методи ідентифікації ризиків є досить ефективними. Проте, під час їх вибору ЗВО потрібно враховувати специфіку свого освітнього процесу.

Наступною процедурою підетапу 3.1 є визначення ризиків, які доцільно проводити за типовою схемою наведеною в роботі [8]. Застосування даної схеми дозволяє визначити ризики освітньої діяльності ЗВО.

Завершальною процедурою ідентифікації ризиків є їх класифікація, методика проведення якої наведена у роботі [5]. Дані методика передбачає побудову трирівневої структури. На першому рівні ризики поділяють на групи, на другому рівні – на підгрупи, на третьому рівні – обґрунтовують фактори (чинники), що обумовлюють ризики освітнього процесу. Класифікація ризиків освітнього процесу за даною методикою наведена у роботі [5]. Такий підхід до побудови класифікації дозволяє встановити взаємозв'язки між рівнями та визначити їх фактори впливу.

Для якісного оцінювання ризиків застосовується підетап 3.2. Під час якого, згідно зі стандартом [3] визначаються ймовірність та рівень наслідків попередньо ідентифікованих ризиків. Даний підетап складається з трьох процедур: аналізу ідентифікованих ризиків, остаточного формування переліку ризиків й визначення ймовірності та рівня наслідків ризиків.

Перша процедура підетапу 3.2 – аналіз ідентифікованих ризиків передбачає поглиблене їх розуміння. Тобто дозволяє визначити причини і джерела ризиків, ймовірності виникнення та їх наслідки. Для цього потрібно мати якісні вхідні дані щодо загального оцінювання ризиків, на основі яких надалі можна приймати обґрунтовані рішення. Результати обробляються експертною групою за допомо-

гою методів ранжування. Кінцевою метою даного підетапу є остаточне формування переліку ризиків, що є наступною процедурою. За вимогами стандарту [3] для цього визначається характер і тип впливу за припущеннями, що відбуваються за конкретної події чи настають за конкретних обставин. Дана подія може викликати різний ступінь впливу та негативно впливати на складові освітнього процесу. Тому вона потребує аналізу якісної оцінки її наслідків.

Для визначення ймовірності та рівня наслідків ризиків щодо їх значущості використовуються наступна шкала – «незначний», «низький», «середній», «високий», «дуже високий».

В ході проведення експерименту для КНУТД, робочою групою було встановлено шість основних видів ризиків, які впливають на освітній процес. Повна характеристика цих ризиків наведена в роботі [7]. Це:

- 1) ризики проектування навчання;
- 2) ризики матеріально-технічної бази навчання;
- 3) ризики професорсько-викладацького складу;
- 4) ризики наукової діяльності;
- 5) ризики виховної роботи;
- 6) ризики випуску фахівців.

В подальшому ці ризики були структуровані, для кожного з них було визначено одиничні показники, наприклад для ризику недостатнього розвитку чи застарілого матеріально технічного забезпечення, одичними показниками є: недостатнє фінансове забезпечення; недостатнє впровадження інформаційних та інноваційних технологій; відсутність обладнання з використанням інформаційних технологій; відсутність сучасних лабораторних установок тощо.

Отже, як видно з наведеного вище, одиничні показники дозволяють оцінювати підпроцеси, з яких складається освітній процес в цілому.

Схема ризиків освітнього процесу наведена на рис. 3.

Для остаточного формування переліку ризиків, за допомогою експертних методів була сформована таблиця 2.

Проте, оскільки якісний аналіз не дає повного уявлення про рівень впливу ризиків та їх наслідки, доцільно, згідно стандарту [3] застосовувати кількісне оцінювання, підетап – 3.3 (рис. 1). Для цього в ході оцінювання експертною групою визначаються ймовірність та рівень наслідків ризиків.

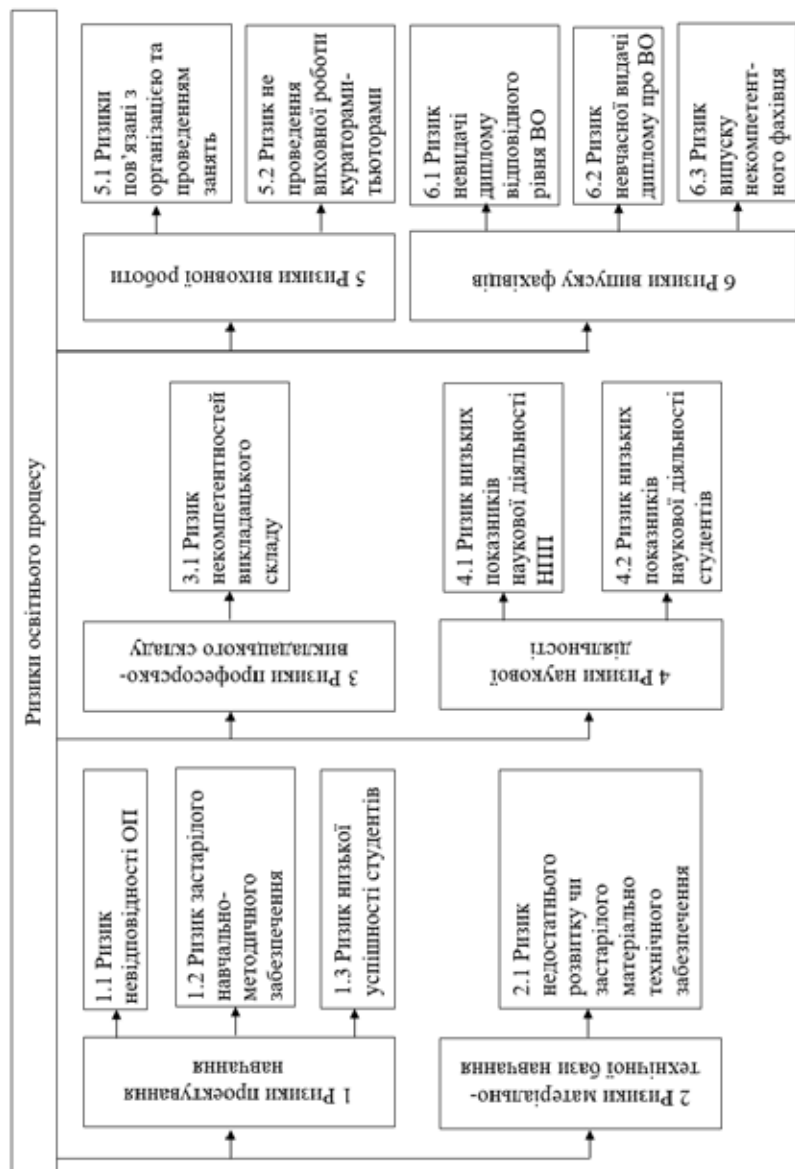


Рис. 3. Структурна схема ризиків освітнього процесу ЗВО [7]

## Ризики освітнього процесу

Інтегровані показники	Одиничні показники	Наслідки ризиків
1	2	3
1. Ризики проектування навчання		
1.1. Ризик невідповідності ОП	ОП не відповідає системі освітніх компонентів	не буде отримано відповідних очікуваних результатів навчання
1.2. Ризик застарілого навчально-методичного забезпечення	недостатнє навчально-методичне забезпечення (підручники, конспекти лекцій, методичні розробки до усіх видів робіт та ін.) недостатнє використання Інтернет-ресурсів	випуск фахівця, що не відповідає вимогам сучасності
1.3. Ризик низької успішності студентів	низький рівень попередньої підготовки несприйняття матеріалу, що викладається неуважність пропуски занять без поважних причин невиконання плану СРС	фахівець не набуде загальних та спеціальних компетентностей у повному обсязі ускладнюється засвоєння матеріалу студентом, що мав перерву у навчанні
2. Ризики матеріально-технічної бази навчання		
2.1. Ризик недостатнього розвитку чи застарілого матеріально-технічного забезпечення	недостатнє фінансове забезпечення недостатнє впровадження інформаційних та інноваційних технологій відсутність обладнання з використанням інформаційних технологій відсутність сучасних лабораторних установок	недоотримання студентами практичних та теоретичних навиків роботи

1	2	3
3. Ризики професорсько викладацького складу		
3.1. Ризик некомпетентностей викладацького складу	несвоєчасна заміна професорсько-викладацького складу недостатня кількість своєчасно захищених аспірантів та докторантів недостатній досвід роботи за спеціальністю низький рівень якості викладання вузькопрофільні знання	недоотримання студентами практичних загальних та спеціальних компетентностей
4. Ризики наукової діяльності		
4.1. Ризик низьких показників наукової діяльності НПП	низький рівень публікацій викладачів у наукометричних базах	не буде досягнуто методології наукових засад та компетентностей необхідних для професійної діяльності для ефективного виконання завдань інноваційного характеру [9]
4.2. Ризик низьких показників наукової діяльності студентів	низький рівень залучення студентів до наукової роботи (участь в олімпіадах, конкурсах, виставках, конференціях, стартапах, інкубаторах наукових гуртках та ін.)	студенти не досягнуть необхідних наукових навиків необхідних для здобуття певного рівня ВО
5. Ризики виховної роботи		
5.1. Ризики пов'язані з організацією та проведенням занять	некоректний графік навчального процесу та розкладу занять неявка студентів на заняття (з поважної причини, без поважної причини) відсутність викладачів (через: хворобу, представництво ЗВО в різних сферах діяльності (методичні Ради, Вчені Ради, Спеціалізовані Ради і т.д.) відсутність викладачів та студентів через непередбачувану ситуацію	недоотримання студентами загальних та спеціальних компетентностей, теоретичних та практичних навиків роботи

Закінчення таблиці 2

1	2	3
5.2. Ризик не проведення виховної роботи кураторами-тьюторами	куратори не виконують своїх обов'язків (не проводять зустрічей зі студентами групи та виховної роботи не приймають участь у різноманітних культурно-масових заходах не обговорюють результати навчання і т.д.)	не виконання НПП виховної роботи навчального процесу студенти не володітимуть необхідною інформацією незадоволеність студентами умовами навчання та проживання в гуртожитку
6. Ризики випуску фахівців		
6.1. Ризик невидачі диплому відповідного рівня ВО	студента було відраховано: за неуспішність за порушення графіку відвідувань занять за не оплату навчання (контрактна форма навчання)	впливає на престижність ЗВО втрата контингенту
6.2. Ризик невчасної видачі диплому про ВО	затримка видачі диплому в зв'язку з виготовленням диплому за певних обставин студента (несплата за диплом не підписаний обхідний лист, сімейні обставини, декретна відпустка, хвороба та ін.)	виникають проблеми з працевлаштуванням з причин затримки видачі диплому
6.3. Ризик випуску некомпетентного фахівця	випускник (відповідного рівня вищої освіти) не досяг необхідних результатів навчання (отримав низький рівень знань) та недостатній рівень практичних навиків	роботодавці отримають некомпетентного фахівця, який не відповідає кваліфікаційному рівню, що матиме негативний вплив на престиж ЗВО втрата контингенту недоотримання роботодавцями необхідних спеціалістів

На нашу думку, аналіз ризиків буде ефективним у випадку застосування напівкількісного ранжування ризиків експертною групою.

Найбільш розповсюдженими методами кількісного оцінювання є «Матриця наслідків/ймовірностей» та «Картографування ризиків». Суть методу – «Матриця наслідків/ймовірностей» полягає у поєднанні якісних та напівкількісних оцінок ймовірностей та наслідків що дозво-



ляє проранжувати ризики та визначити їх рівень. Даний метод, як правило застосовується для визначення пріоритетності аналізу ризиків [3].

Метод базується на використанні спеціальних шкал, вибір яких обумовлюється діапазоном ймовірності та наслідків, які об'єднуються матрицею. При цьому найнижча ймовірність характеризує найбільш небезпечний ризик.

До переваг даного методу слід віднести простоту застосування, а до недоліків труднощі однозначного визначення шкал для рівнів ризиків для різних категорій наслідків.

Практичний досвід доводить, що універсальним інструментом ризик-менеджменту є «Карта ризиків». Згідно [10] вона будується на основі остаточно сформованого переліку (реєстру) ризиків, їх якісному та кількісному оцінюванні. На рис. 4 наведена карта ризиків освітнього процесу КНУТД.

Як видно з рис. 4, найбільший вплив на освітній процес має – ризик невідповідності освітньої програми 1.1 (таблиця 2). Даний ризик попадає у «дуже високу» зону впливу та ймовірності. В зону «високого» впливу потрапляє – ризик випуску некомпетентного фахівця – 6.3 (таблиця 2). Зона високого впливу та середньої ймовірності має високий рівень впливу. Наведені вище ризики, що попадають в зону впливу та ймовірності «високий – дуже високий» потребують особливої уваги з боку керівництва ЗВО та розроблення і впровадження комплексу дій щодо їх зменшення, оскільки вони вийшли за межі критичної границі (жирну криву лінію). Ризик недостатнього розвитку чи застарілого матеріально-технічного забезпечення – 2.1 (таблиця 2) знаходиться на межі критичної зони терпимості ризиків. Слід зазначити, що ці ризики, в будь-який момент можуть потрапити у «високу зону», тому вони також потребують прийняття рішень щодо їх зменшення. Ризики, які потрапляють в зону середньої вагомості, потребують періодичного контролю, з метою мінімізації їх впливу на освітній процес. Ризики, які знаходяться в зоні «значний – незначний» не мають особливого впливу на освітній процес, тому як правило не несуть загрозу якості його проведення й потребують меншої уваги.

Таким чином, результати застосування методу картографування дозволяють ранжувати ризики за вагомістю, тобто оптимізувати їх перелік для подальшого аналізу оцінювання наслідків впливу. Це дає можливість ЗВО визначити найбільш схильні до ризику зони освіт-

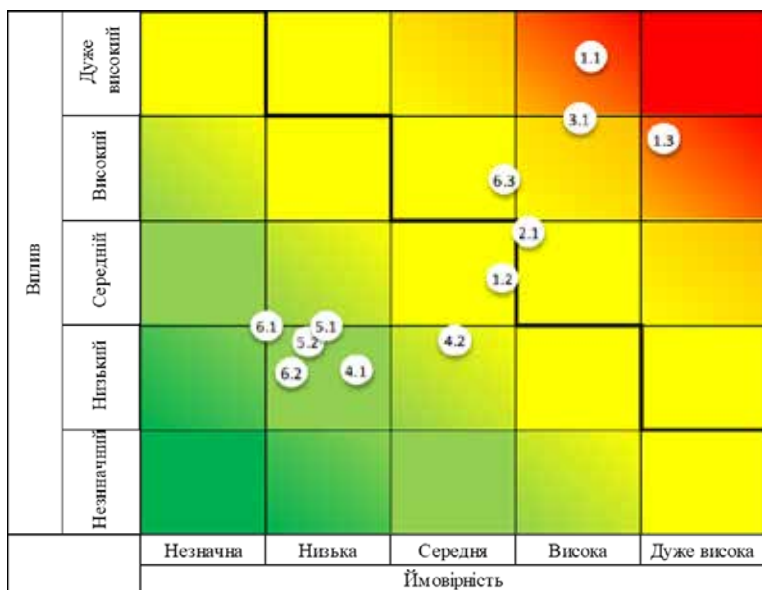


Рис. 4. Карта ризиків освітнього процесу

нього процесу та передбачати в майбутньому розробку дієвих способів контролю та механізмів їх мінімізації.

Наступним підетапом загального оцінювання ризиків є перевірка результатів на вірогідність інформації – 3.4, у разі, якщо інформація не достовірна то перехід відбувається на підетап – 3.2. У разі, якщо якісного аналізу недостатньо, потрібно повернутись на підетап 3.1, у випадку, якщо інформація достовірна то переходимо на підетап – 4.

До **підетапу 4**, входять наступні процедури: розроблення (погодження та впровадження) плану дій.

Наприклад, план дій повинен включати: посилення контролю, шляхом введення додаткових перевірок розроблених чи існуючих освітніх програм на відповідність до вимог чинної нормативної бази; моніторинг навчально-методичного забезпечення; проведення додаткових зрізів знань студентів; залучення спонсорів, меценатів для закупівлі нового сучасного обладнання; проведення планового підвищення рівня кваліфікації науково-педагогічних працівників, проведення тематичних заходів, щодо

обміну досвіду між НПП, різних напрямів викладання; посилення контролю наукової діяльності НПП і студентів; заохочення студентів до наукової діяльності; введення реєстру відвідувань студентами та НПП занять; контроль за проведенням виховної роботи кураторами-тьюторами; друкувати дипломи у перевірених типографіях; проводити моніторинг набутих студентами компетентностей, відповідно до освітньої програми тощо.

Алгоритм оцінювання ризиків освітнього процесу ЗВО, який наведено на рис. 1 має замкнутий цикл і згідно з принципами TQM спрямований на постійне поліпшення, шляхом моніторингу і перевірки достовірності інформації. Моніторинг є невід'ємною процедурою процесу управління ризиками та дає можливість проводити критичний аналіз обробки ризиків та перевіряти дієвість заходів щодо їх мінімізації. Запланований за даним алгоритмом моніторинг, доцільно проводити за схемою наведеною на рис. 5.

За результатами моніторингу робочою групою розробляються і впроваджуються коригуючі і попереджуючі дії, які дозволяють знизити ризики освітнього процесу.



Рис. 5. Схема моніторингу освітнього процесу ЗВО

### 3. Висновки

Результати досліджень доводять доцільність застосування вимог стандарту ДСТУ ISO 31010:2013 для ідентифікації та аналізу потенційних ризиків освітнього процесу ЗВО. Для оцінювання ризиків освітнього процесу розроблено спеціальний чотирьох кроковий алгоритм, в основу якого покладено системний підхід, принципи загального управління якістю (TQM), ризик-менеджмент та вимоги стандарту ДСТУ ISO 31010:2013. Застосування даного алгоритму дозволяє оцінювати ризики освітнього процесу на всіх етапах його життєвого циклу та за результатами моніторингу розробляти організаційно-технічні заходи по їх зменшенню.

Для практичної реалізації алгоритму розроблені методичні рекомендації, які стосуються загального оцінювання ризиків (ідентифікації, якісного аналізу та кількісного оцінювання).

Перспективи подальших досліджень, на наш, погляд пов'язані з більш детальним вивченням ризиків освітнього процесу, зокрема їх впливом на економічні складові діяльності закладів вищої освіти.

### Список літератури:

1. ISO Guide ISO 73:2009 «Risk management – Vocabulary – Guidelines for use in standards».
2. ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines».
3. ДСТУ ISO 31010:2013 (IEC/ISO 31010:2009, IDT) «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику». – Київ : Мінекономрозвитку України, 2015.
4. Волівач А.П. Застосування SWOT-аналізу для оцінювання ризиків діяльності ЗВО // А.П. Волівач, Г.І. Хімичева // *Вісник інженерної академії України*. – 2018. – № 4. – С. 196–203.
5. Волівач А.П. Класифікація ризиків навчального процесу на основі застосування методу ієрархій // А.П. Волівач, Г.І. Хімичева // *Monografia Pokonferencyjna. Science, Research, Development. №19 (Наука, исследования, развитие. №19) 30.07.2019 – 31.07.2019 Valletta (Republic of Malta)*. С. 96–106.
6. Волівач А.П. Застосування методу PEST-аналізу для визначення впливу факторів ризиків на освітню діяльність ЗВО / А.П. Волівач, Г.І. Хімичева // *Проблеми інженерно-педагогічної освіти. Збірник наукових праць*. – 2018. – Випуск 59. – С. 74–82. – Режим доступу: [https://er.knutt.d.edu.ua/bitstream/123456789/12478/1/20190516\\_302.pdf](https://er.knutt.d.edu.ua/bitstream/123456789/12478/1/20190516_302.pdf) (дата звернення: 27.10.2019).
7. Волівач А.П. Звіт за ініціативною темою № 0116U008731 «Оцінювання ризиків освітніх послуг відповідно до вимог стандартів і рекомендацій ESG та міжнародних стандартів ISO 9001:2015» / А.П. Волівач, Г.І. Хімичева // м. Київ, КНУТД, 2018. – 84 с.
8. Волівач А.П. Визначення факторів ризиків у відповідності до моделі СУЯ ВНЗ за вимогами ДСТУ ISO 9001:2015 / А.П. Волівач, Г.І. Хімичева //

Міжнар. конф. «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» ТОМ I. 21 листопада – 24 листопада 2017 р., м. Відень, Австрія. С. 48–57.

9. Закон України «Про вищу освіту» Документ 1556-VII, чинний, поточна редакція – Редакція від 09.08.2019, підстава – 2745-VIII. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 27.10.2019).

10. Пименов Н.А. Управление финансовыми рисками в системе экономической безопасности : учебник и практикум / Н.А. Пименов, В.И. Авдийский ; под общей редакцией В.И. Авдийского. – Москва : Издательство Юрайт, 2016. – 413 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-3110-5.

### References:

1. ISO Guide ISO 73:2009 «Risk management – Vocabulary».
2. ISO 31000:2018 «Risk management – Guidelines».
3. DSTU ISO 31010:2013 (IEC/ISO 31010:2009, IDT) «Keruvannia ryzykom. Metody zahalnoho otsiniuvannia ryzyku». – Kyiv: Minekonomrozytku Ukrainy, 2015. (in Ukrainian)
4. Volivach A.P., Khimicheva H.I. (2018). Zastosuvannia SWOT-analizu dlia otsiniuvannia ryzykiv diialnosti ZVO. *Visnyk inzhenernoi akademii Ukrainy*, 4, 196-203. (in Ukrainian)
5. Volivach A.P. Klasyfikacija ryzykiv navchalnogho procesu na osnovi zastosuvannja metodu ijerarkhij // A.P. Volivach, Gh.I. Khimicheva // Monografia Pokonferencyjna. Science, Research, Development. № 19 (Nauka, yssledovanyja, RAZVYTYE. №19) 30.07.2019 – 31.07.2019 Valletta (Republic of Malta).
6. Volivach A.P., Ximicheva G.I. (2018). Zastosuvannia metodu PEST-analizu dlya viznachennja vplivu faktoriv rizikiv na osvitu dlyalnist ZVO. *Problemi inzhenerno-pedagogichnoï osviti. Zbirnik naukovix prac*, 59, 74–82.
7. Volivach A.P. (2018). Zvit za iniciatyvnoju temoju №0116U008731 «Ocinjuvannja ryzykiv osvitnikh poslugh vidpovidno do vymogh standartiv i rekomendacij ESG ta mizhnarodnykh standartiv ISO 9001:2015» / A.P. Volivach, Gh.I. Khimicheva. – Kyiv: KNUTD. (in Ukrainian)
8. Volivach A.P. (2017). Vyznachennja faktoriv ryzykiv u vidpovidnosti do modeli SUJa VNZ za vymoghamy DSTU ISO 9001:2015 / A.P. Volivach, Gh.I. Khimicheva // Mizhnar. конф. «Інновацијни tehnologhiji v nauci ta osviti. Jevropejskij dosvid» T. I. 21 lystopada – 24 lystopada 2017 r., Videnj, Avstrija.
9. Закон України «Pro vyshchu osvitu» [Law of Ukraine «Higher Education»]. (n.d). Retrieved from: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/1556-18/> (in Ukrainian)
10. Pymenov N.A. (2016). Upravlenye fыnansovыmy rыskamy v systeme ekonomыcheskoj bezopasnosti : uchebnyk y praktykum / N.A. Pymenov, V.Y. Avdyjskij; pod obshhej redakcyey V.Y. Avdyjskogho. – Moskva : Yzdatelstvo Jurajt. (Bakalavr. Akademыcheskыj kurs). – ISBN 978-5-9916-3110-5.

## RADIOMETRIC METHOD FOR ASSESSING THE DEPTH OF THERMAL INJURIES

Yuliya Shtefura<sup>1</sup>

Kostyantyn Shevchenko<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-62>

**Abstract.** This study indicates the need for early diagnosis of the depth of thermal injuries. It was noted that burning injuries account for more than 10% of the total occurrences of injuries. Such statistics indicate the relevance of the use of standard operating procedures for assessing thermal injuries. The analysis of existing standard operating procedures for assessing the depth of thermal injuries has been conducted. The analysis results indicate that at present laser and ultrasonic flowmetry, radiographic and thermographic methods are the most widely used methods for assessing the depth of thermal injuries. Laser and ultrasonic flowmetry methods are based on the study of microcirculation of blood in body tissues. The use of laser radiation sources ensures the differentiation of healthy and damaged tissues at a depth of several millimeters. Complexity and its absence in diagnostic and surgical centers is the main problem of using such equipment. In addition, surface lesions of the skin cover leads to significant errors. The ultrasonic range allows one to increase the depth of diagnosis. However, the equipment used presupposes providing mechanical contact with the affected tissue, which is not always possible. Radiographic methods make it possible to evaluate the depth of thermal damage to biological tissues with high accuracy. Their widespread use for practical diagnosis of burn depth limits the cost of equipment. Besides that, such methods are unsafe for humans. The use of thermographic methods in studying the surface of a burning lesion is very promising. They make it possible to visualize the condition of tissues, do not require the use of radiation, which is harmful to the body, dyes and contrast agents. Their main disadvantage is a

---

<sup>1</sup> Graduate Student of Department of Computer-Integrated Technologies and Measuring Equipment, Kiev National University of Technology and Design, Ukraine

<sup>2</sup> Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine

strong influence on the result of the condition of surface tissues. The results of the analysis indicated that in the domestic and foreign literature there is no information on the use of specialized measuring systems in the diagnosis of burning injuries. This predetermines the urgent need of creating such equipment. Main objective of research – to develop new methods and instruments that allow such an assessment to be performed non-invasively and notouch during the early stages. This study contains the substantiation of the possibility of using its own microwave electromagnetic radiation for assessing the depth of thermal injuries. A scheme, which allows such measurements to be made, is suggested. An algorithm for its operation is described.

### 1. Introduction

One of the common forms of injuries in industrial and domestic conditions is thermal injuries (burns). According to the information of the World Health Organization in world practice, thermal injuries take third place among other injuries. And in the post-Soviet states they account for more than 10% of the total structure of injuries [1, p. 20]. About 60 thousand people die from burns every year in the world [2, p. 8]. Treatment of burns nowadays remains one of the most difficult problems of surgery. It has not only medical, but also socio-economic significance. This is due to the relatively large relative share of burns among other injuries, high mortality and disability among victims, the cost of their treatment.

In case of burn shock, peripheral vascular spasm occurs. It is followed by expansion, slowing of blood flow, impaired haemopexis, micro thrombosis, impaired metabolic processes, hypoxia, impaired permeability of vascular and cell membranes, pulmonary artery spasm due to the release of catechol amines and impaired vascular permeability with the release of water into the lung parenchyma and other pathophysiological changes.

These changes occur within 6...8 hours after suffering a thermal injury. Therefore, the early start of therapeutic measures for preventing and compensating for them increases the likelihood of a favorable course of burn disease and reduces the occurrence of severe complications.

The main problem in this case is associated with the choice of the correct treatment technique, which depends on the severity of thermal injury. A present there is no single international classification of burn severity

[3, p. 21]. Thus, abroad thermal injuries are usually divided into 3 groups. According to the classification adopted at the II Congress of Surgeons of Ukraine in 2002, thermal injuries shall be divided into 4 groups. In the countries of the former Soviet Union, it is customary to distinguish 5 groups of thermal injuries. Such an approach makes it extremely difficult to formulate universal principles for assessing the severity of thermal injuries and developing unique methods for their treatment.

In all cases, the severity of thermal injury shall be determined by two main parameters – area and depth. Assessing the area of injury is not that problematic. There are many methods available for determining it. Assessing the depth of thermal injury is very problematic at present. This is due to many factors, among which one can distinguish the following ones:

- absence of specialized measuring instruments and standards for simulating thermal injuries of different depths;
- the difference in the surface condition of the injured areas depending on the type of heat agent, etc.

Thus, the diagnosis of deep thermal injuries using non-invasive methods is extremely difficult, especially in the early stages after getting injured. Therefore, when determining the severity of the condition, one often focuses on the total area of the burn, especially in case of a mass flow of injured. In most cases, this approach does not allow one to choose the correct method of treatment.

In this regard, we can conclude the relevance of the development of methods and instruments for non-invasive assessment of the depth of thermal injuries of biological tissues.

## **2. Analysis of methods for assessing the depth of thermal injuries**

According to the terminology, which is accepted in combustiology, methods for assessing the depth of thermal injury are divided into physical methods and standard operating procedures. The first ones involve the use of various kinds of mechanical impacts on damaged tissue and are not considered in this study. The use of standard operating procedures that allow assessing the depth of the injury without direct contact with injured tissue is of greatest interest.

The temperature threshold for human tissue viability is 45...50°C. In case of their overheating, irreversible changes (coagulation) of proteins



occur; cellular enzymes are inactivated, metabolic processes are disrupted, blood circulation ceases. This leads to tissue necrosis. For most of the standard operating procedures discussed below, it is the circulation of blood in the blood vessels that is used as an informative parameter that indicates the depth of the lesion [4, p. 105].

Various methods and methods for diagnostics of skin vitality using laser Doppler flowmetry have been suggested in medical practice [5, p. 11; 6, p. 1]. The authors state that in case if blood microcirculation is during tissue examination, a superficial dermal burn shall be diagnosed. In case of tissue death at a depth of more than 1 mm and, accordingly, absence of blood microcirculation, a deep dermal burn shall be diagnosed.

However, in order to obtain reliable results, indicators of blood microcirculation only in a separate area of the skin are not enough. One shall take into account the general condition of the vascular system and the individual characteristics of the body. In addition, there is a disadvantage, because surface damage prevents the penetration of the laser beam into the tissue. This causes significant errors in the diagnosis of the depth of thermal injury. It is also worth mentioning that the diagnosis of the depth of thermal injury using laser Doppler flowmetry firstly requires the use of complex stationary devices. At the same time, in many cases they do not provide an unambiguous response about the depth of thermal injury and require further research. The consequence of this is that laser Doppler flowmetry methods are not used for the quantitative evaluation of the depth of thermal injury, but for obtaining a qualitative characteristic – the severity of thermal injury.

Some authors use the ultrasonic range of electromagnetic radiation instead of the optical spectrum for the diagnostics of the depth of thermal injury [7, p. 1]. The use of ultrasonic radiation helps increasing the depth of penetration of the probe signal into the tissue under study and allows using additional informative parameters. Thus, the study [8, p. 1] suggests assessing the condition of tissues according to the combined data of Doppler and Elastography ultrasound studies. This approach allows one to replicate the picture of blood flow in the tissues adjacent to the damage area, and thereby draw a conclusion about the depth and degree of tissue injury. However, this is true only for tissues that are located near the passage of the great vessels, which are achievable for hardware research. In other areas, this data is either impossible to obtain or not reliable. Another significant drawback is

that Elastography data can only be obtained in the depth of dissected coagulation-necrotic tissues. That is, such a diagnosis is not only traumatic, but also delayed in time.

Some authors [9, p. 1] suggest assessing the depth of tissue injury using contact method. In this case, the amplitude of the reflected ultrasonic wave on the damaged and intact tissues of morphologically identical zones is being compared. This approach allows non-invasively, in any condition of the victim, even in the presence of burn shock, to identify the boundaries of the burn injury. But at the same time it is possible to detect only gross tissue changes in the form of coagulation necrosis at a depth of not more than 10 mm. This is due to the capabilities of the selected devices, namely surface ultrasonic waves at a frequency of 1.25 MHz.

The absence of unambiguous positive results of assessing the depth of thermal injuries leads to an expansion of the methods used for diagnosis. Thus, in the study [10, p. 1] authors suggest inject a contrast agent and a water-soluble dye directly into the tissue of the supposed injury. X-ray examination of damaged tissue shall be conducted in 12...24 hours. In this case a residual accumulation of contrast is a sign of tissue death. However, in this case, only dead tissue is contrasted even with the existing border zone, that is, in the distant period. The width of the paranecrosis zone and the functional-morphological changes in it, that are observed during the first 3...5 days after thermal injury, cannot be determined in this way.

In the study [11, p. 1] the authors conduct a computed tomographic study and determine the signs of tissue death and coagulation necrosis zones according to their x-ray density. In this case the delimitation of the coagulation necrosis zone shall be carried out by determining the density of tissues in Hounsfield Units (HU). Areas with reduced density (12-15 HU), as well as areas with increased density (65-68 HU), shall be diagnosed as areas of tissue necrosis.

This method allows determining the volume of dead tissue, but does not display their functional condition in the zone, which is qualified as a zone of necrosis. That is, it does not allow delimiting the area of necrosis itself and irreversible changes from areas of reversible changes (paranecrosis areas).

X-ray methods generally allow assessing the depth of thermal injury to biological tissues with high reliability. However, the cost of such equipment and the need for qualified personnel significantly limit their use in the

practical diagnosis of burn depth. In addition, these methods alone are not beneficial to the human body.

Thermographic methods occupy an important place in assessing the depth of thermal injuries. The basis of their use is the fact that, in case of burn tissue injury, coagulation of blood vessels occurs. As a result of this blood circulation is disturbed. This reduces the temperature of the surface layers of the skin. According to some authors [12, p. 761] a temperature difference of homologous skin segments of  $1^{\circ}\text{C}$  indicates the presence of superficial dermal burns. A temperature difference of  $2^{\circ}\text{C}$  and a wound temperature of less than  $34^{\circ}\text{C}$  indicate the presence of deep dermal burns.

Thermographic studies of the surface of the burn injury, as well as the previously considered x-ray studies, make it possible to visualize the state of body tissues. It is worth mentioning that the cost of equipment, if compared with the previously discussed methods, the thermographic method is one of the most affordable. In addition, the use of thermographic studies does not require the use of harmful radiation, dyes and contrast agents that are introduced into the body.

A classic example of thermographic study is described in the study [13, p. 1]. The authors determine the temperature of the body and wounds using a thermal imager. Studies are carried out remotely using special infrared optics. The radiation of the human body is converted into electrical signals, which either give images on the monitor screen, or are registered on special paper. In this way, a temperature pattern of the surface of the human body can be obtained with all its main features and shades that are caused by physiological and pathological processes. The disadvantages of this solution are the need to use expensive specialized equipment that burn and surgical departments do not possess.

In the study [14, p. 1] authors suggest performing preliminary temperature measurements in various parts of the body: thermal injuries and unaffected skin of one homologous segment. It uses a notouch digital infrared thermometer. According to the authors, when performing such studies, the temperature difference of the sections of the thermal injury is from  $0,5^{\circ}\text{C}$  to  $3,5^{\circ}\text{C}$  compared to the intact skin surface. This allows differentiating the depth of burn. But, it is difficult to obtain a complete picture of a burn during spot measurements using an infrared thermometer. In addition, the measurement result largely depends on the surface condition of both thermal injury and the skin itself.

The conducted analysis allows drawing several conclusions regarding the use of equipment for clinical laboratory evaluation of the depth of thermal injuries. Firstly, in the domestic and foreign literature there is no information on the use in practice of diagnosis and treatment of thermal injuries of specialized measuring systems. For the most part, equipment of a different functional purpose, not intended for such studies, is used to diagnose the depth of thermal injuries. Secondly, the use of the considered methods often implies the need for the introduction of additional drugs into the body and surgical interventions, which often does not contribute to the acceleration of treatment. Thirdly, some methods make it possible to assess the degree of thermal injury only 3...5 days after receiving the injury. In most cases this is unacceptable.

Thus, taking into account the state of the problem of assessing the depth of tissue injuries during thermal exposures, it is extremely important to develop new methods and instruments that allow such an assessment to be performed non-invasively and notouch during the early stages.

### **3. Assessment of the depth of thermal injuries according to the level of inherent electromagnetic radiation of body tissues**

Radiometric method is one of the promising methods for assessing the depth of the location of vital biological tissues.

It is well known [15, p. 311], that one of the manifestations of the activity of living cells of organisms is its inherent electromagnetic radiation (EMR) of the microwave range. The intensity of inherent microwave radiation shall be determined by the activity of biological processes in the cells of living organisms. The level of this radiation is very low ( $10^{-14} \dots 10^{-15}$  W). It is comparable with the level of thermal radiation of dielectrics in the indicated frequency range.

According to the current laws of physics, anybody, which is heated to a certain temperature, emits a wide range of thermal radiation. For objects having a temperature in the range of 20...40°C, a frequency band is characteristic in the infrared region of the spectrum, where the EMR intensity has maximum values. However, infrared radiation from the internal structures of biological tissues is shielded by the skin cover. That is why the use of thermographic methods gives the temperature difference between living and non-living tissue at the level only 1...2°C.

While analyzing the components of the thermal radiation of living organisms, the following features should be mentioned. The emissivity of any heated bodies in the microwave range obeys the Rayleigh-Jeans law

$$B = 2f^2 k T \beta / C^2,$$

where:  $f$  – frequency;  
 $k$  – Boltzmann constant;  
 $T$  – temperature;  
 $\beta$  – radiation value;  
 $C$  – speed of light in vacuum.

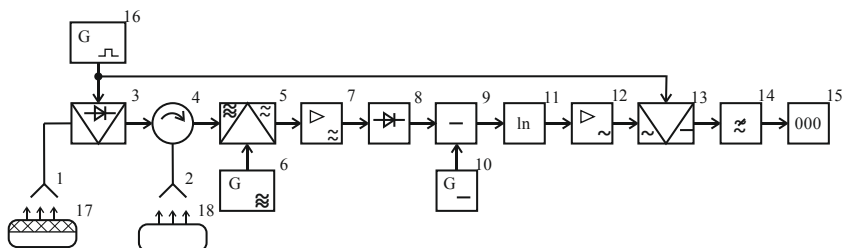
Biological tissues that contain viable cells have non-thermal EMR in the microwave range (30...500 GHz). Acoustoelectric processes that occur in cell membranes are the source of EMR. Their intensity characterizes the interaction of protein molecules and intracellular structures. The density of coherent electromagnetic waves emitted by cells already at a small distance from their surface decreases many times. Moreover, this decrease is accompanied by stochastization of radiation. This is due to the small size of the cells in comparison with the emitted wavelength.

As a result of this, the coherent radiation of individual cells is converted into a noise EMR, which is added to the original radio thermal EMR, which also has a noise character. Therefore, in order to analyze the level of radiation of living tissue, it is necessary to measure a weak bioinformatic electromagnetic radiation in the microwave range against the background of more powerful radio thermal radiation. This is a difficult task, especially taking into account the fact that the total power of thermal and bioinformatic radiation is several orders of magnitude lower than the noise power of modern electronic measuring equipment.

However, it is worth mentioning that the skin for the EMR microwave range is not a screen, in contrast to thermal radiation. Due to this, the microwave component of EMR is more informative in terms of assessing cell viability, if compared with the infrared component.

Thus, the objective of this study is creating such a device for the analysis of the level of electromagnetic radiation of biological tissues, which provides the measurement of the bioinformatic (microwave) component of electromagnetic radiation regardless of the temperature of the analyzed material.

Figure 1 shows a functional diagram of a device for assessing the level of electromagnetic radiation of biological tissues.



**Figure 1. Functional diagram of a device for assessing the level of electromagnetic radiation of biological tissues**

The following legend is used in the diagram: 1, 2 – measuring and support receiving antennas; 3 – controlled microwave reflector; 4 – circulator; 5 – mixer; 6 – microwave oscillator; 7 – intermediate frequency amplifier; 8 – amplitude detector; 9 – subtractor; 10 – constant voltage source; 11 – logarithmer; 12 – low frequency amplifier; 13 – synchronous detector; 14 – low pass filter; 15 – voltmeter; 16 – low frequency multivibrator; 17 – the analyzed fragment of the affected tissue; 18 – healthy tissue fragment.

The device indicated in the diagram works as follows.

Radiothermal and biological EMR from the measuring receiving antenna 1 while interacting with the analyzed fragment of the affected biological tissue, is fed to the input of a controlled microwave reflector 3. The output of the controlled reflector is connected to one of the inputs of the circulator 4. Radio thermal radiation from the support receiving antenna 2, while interacting with unaffected fragment of biological tissue 18, is fed directly to the second input of the circulator 4.

The microwave reflector 3 is made on p-i-n diodes and works according to the principle of total reflection when voltage is applied to its control input. A periodic change in the reflector mode (reflects – transmits) is carried out by rectangular pulses of modulating voltage, which is created by a low frequency multivibrator 16.

During one half-period of the low-frequency modulating voltage, when the microwave reflector 3 transmits radiation, a dispersion noise signal is input to the mixer 5

$$\bar{U}_{11}^2 = K_1 (\bar{U}_{21}^2 + \bar{U}_3^2 + \bar{U}_4^2), \quad (1)$$

where  $\bar{U}_{21}^2$  – dispersion of radio thermal radiation of the analyzed tissue fragment;

$\bar{U}_3^2$  – dispersion of bioinformatic radiation of viable cells of the analyzed tissue fragment;

$\bar{U}_4^2$  – dispersion of inherent noises of the mixer reduced to its input;

$K_1$  – waveguide transmission coefficient.

During the second half-cycle of the modulating voltage, when the microwave reflector 3 is closed, i.e. fully reflects the radiation; the noise signal from the output of the measuring receiving antenna 1 is reflected. At the same time, the output signal of the support receiving antenna 2 passes through the circulator 4, is reflected from the closed microwave reflector 3, and again through the circulator 4 it is fed to the input of the mixer 5. The dispersion of the input signal of the mixer during this half-cycle takes on the value

$$\bar{U}_{12}^2 = K_1 (\bar{U}_{22}^2 + U_4^2), \quad (2)$$

where  $\bar{U}_{22}^2$  – dispersion of radiothermal radiation of unaffected tissue fragment.

In case if the switching frequency of the multivibrator is determined according to the value of  $\Omega$ . Then, during periodic operation of the microwave reflector 3, an amplitude modulated signal is formed at the input of the mixer 5, consisting of packets of noise signals with dispersions (1) and (2).

Given the real ratio of the component signals (1) and (2), the modulation depth  $M$  of the input signal of the mixer is small  $\bar{U}_4^2 \gg \bar{U}_{21}^2 = \bar{U}_{22}^2 \gg \bar{U}_3^2$  and is represented by the expression

$$M_1 = \frac{\bar{U}_{11}^2 - \bar{U}_{12}^2}{\bar{U}_{11}^2 + \bar{U}_{12}^2} = \frac{\bar{U}_3^2}{2(\bar{U}_4^2 + \bar{U}_{21}^2)}. \quad (3)$$

Using the signal of microwave oscillator 6 the microwave radiation spectrum is transferred to the intermediate difference frequency  $\omega_0$ . It is at this frequency that the frequency amplifier 7 of the intermediate frequency is tuned. The width of the transferred spectrum  $\Delta\omega$  is determined by bandwidth  $\Delta\omega_0$  of the intermediate frequency amplifier with the central frequency  $\omega_0 \gg \Omega$ . During one half-period of the reflector 3, the dispersion of the narrow-band noise signal is at the output of the intermediate frequency amplifier

$$\bar{U}_{s1}^2 = K_1 S_1 K_2 [\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0) + \bar{U}_4^2(\omega_0)]. \quad (4)$$

During the second half-period

$$\bar{U}_{52}^2 = K_1 S_2 K_2 [\bar{U}_{22}^2(\omega_0) + \bar{U}_4^2(\omega_0)]. \quad (5)$$

Signal packages of intermediate frequency  $\omega_0$  with dispersions (4) and (5) alternately are fed at an amplitude detector with a quadratic characteristic. At the detector output, video pulses with amplitudes that are proportional to the dispersion of the detected signals are formed

$$U_{61} = K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 [\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0) + \bar{U}_4^2(\omega_0)], \quad (6)$$

$$U_{62} = K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 [\bar{U}_{22}^2(\omega_0) + \bar{U}_4^2(\omega_0)], \quad (7)$$

where  $S_2$  – steepness of the quadratic detector conversion.

Video pulses  $U_{61}$  and  $U_{62}$  alternately affect one input of the subtractor 9, constant voltage from the source is fed on the other input of it 10. Constant voltage  $U_7$  of the source 10 is set from the condition for compensation of the noise of the mixer, which affect the depth of modulation

$$U_7 = K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 \bar{U}_4^2(\omega_0). \quad (8)$$

When condition (8) is fulfilled, the amplitudes of the video pulses at the output of the subtractor take values

$$U_{81} = K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3 [\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0)], \quad (9)$$

$$U_{82} = K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3 \bar{U}_{22}^2(\omega_0), \quad (10)$$

where  $K_3$  – subtractor transmission coefficient/

After the functional conversion of the video pulses in the logarithmer, their amplitudes take the final form

$$U_{91} = S_3 \ln\{K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3 [\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0)]\}, \quad (11)$$

$$U_{92} = S_3 \ln[K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3 \bar{U}_{22}^2(\omega_0)], \quad (12)$$

where  $S_3$  – steepness of a logarithmic transformation.

The depth of the amplitude modulation of the sequence of video pulses increases and taking into account the equality  $\bar{U}_{21}^2 = \bar{U}_{22}^2$  takes the value

$$M_2 = \frac{U_{91} - U_{92}}{U_{91} + U_{92}} = \frac{\ln \left[ \frac{\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)} \right]}{\ln \left\{ (K_1^2 S_1^2 K_2^2 S_2 K_3)^2 [\bar{U}_{21}^2(\omega_0) + \bar{U}_3^2(\omega_0)] \bar{U}_{21}^2(\omega_0) \right\}}. \quad (13)$$

The low frequency amplifier from the sequence of video pulses (12) isolates and amplifies the variable frequency component  $\Omega$  with amplitude



$$U_{10} = K_4 \frac{U_{91} - U_{92}}{2} = \frac{1}{2} S_3 K_4 \ln \frac{\bar{U}_{21}^2 + \bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)}. \quad (14)$$

where  $K_4$  – low frequency amplifier gain ratio.

Expression (14) can be represented as

$$U_{10} = \frac{1}{2} S_3 K_4 \ln \left[ 1 + \frac{\bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)} \right]. \quad (15)$$

After expanding it into a power series, we obtain

$$U_{10} = \frac{1}{2} S_3 K_4 \left[ \frac{\bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)} - \frac{\bar{U}_3^4(\omega_0)}{2\bar{U}_{21}^4(\omega_0)} + \dots \right]. \quad (16)$$

The power of bioinformatic radiation is much lower than the power of thermal radiation ( $\bar{U}_3^2 \ll \bar{U}_{21}^2$ ). Therefore, the second and subsequent terms of expansion terms (16) can be neglected. Then there is the following voltage at the output of the amplifier

$$U_{10} = \frac{1}{2} S_3 K_4 \frac{\bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)}. \quad (17)$$

Voltage  $U_{10}$  is rectified by a synchronous detector, which is controlled by the square voltage of the multivibrator, and is smoothed by a low-pass filter. DC output voltage is measured using a voltmeter.

From the expression (17) it is clear that the voltmeter readings are proportional to the ratio of bioinformatic and radiothermal radiation powers

$$\alpha = K_0 \frac{\bar{U}_3^2(\omega_0)}{\bar{U}_{21}^2(\omega_0)}. \quad (18)$$

where  $\alpha$  – voltmeter readings;

$K_0 = \frac{1}{2} S_3 K_4$  – coefficient of proportionality.

The power ratio is a measure of the EMR level of viable biological tissue cells. The resulting ratio shall be determined by the intensity of biochemical processes in living tissues and allows assessing the depth of thermal injury.

The ability to use receiving antennas with different geometries allows localizing the area of the tissue fragment under study in the range from several square millimeters to several tens of centimeters.

Independence of the ratio  $\eta$  from weight due to the fact that the power of both bioinformatic and radio thermal radiation is proportional to the effective area of the receiving antennas. In addition, the measured power ratio does not depend on the transfer properties of the connecting wave-

guides ( $K_1$ ), the inconsistency of the steepness of the heterodyne conversion of the spectrum of the compared signals ( $S_1$ ), the instability of the gain of the selective intermediate-frequency amplifier ( $K_2$ ), the sensitivity of the amplitude detector ( $S_2$ ) and the gain ratio of the subtractor ( $K_3$ ).

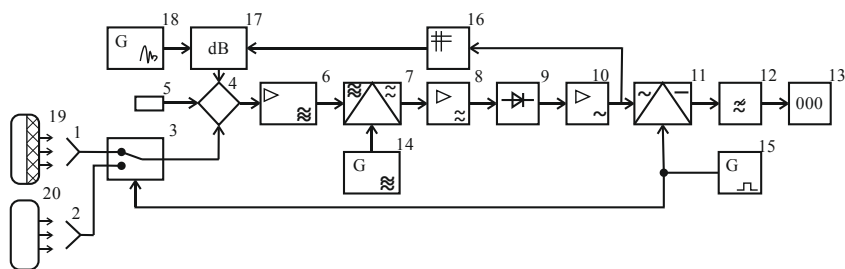
Proportionality factor  $K_0$  depends only on the stability of the low-frequency blocks of the circuit and is determined during the calibration process using samples of microorganisms, the emissivity of which shall be estimated according to the results of biochemical studies.

#### 4. Differential radiometer for recording the difference values of radiation intensities

To study the gradients of the electromagnetic field of biological objects, you can use differential radiometers that measure the difference in radiation intensities from neighboring or remote biologically active points, as well as various (for example, symmetrical) body parts.

To increase the sensitivity of differential radiometers, it is reasonably to use power feedback to small difference intensities, which provides a deep modulation [16, p. 220].

Figure 2 shows a functional diagram of a differential radiometer for recording the difference values of radiation intensities.



**Figure 2. Functional diagram of a differential radiometer for recording the difference values of radiation intensities**

The following legend is used in the diagram: 1, 2 – measuring and support receiving antennas; 3 – microwave switch; 4 – hybrid tee; 5 – matched load; 6 – microwave amplifier; 7 – microwave mixer; 8 – intermediate frequency amplifier; 9 – amplitude detector; 10 – low-frequency amplifier;

11 – synchronous detector; 12 – low pass filter; 13 – voltmeter; 14 – microwave oscillator; 15 – low frequency multivibrator; 16 – control unit; 17 – controlled attenuator; 18 – noise generator; 19 – the analyzed fragment of the affected tissue; 20 – healthy tissue fragment.

The device indicated in the diagram works as follows.

The thermal radiation from the surface of an object is received by microwave antennas 1 and 2. The output signals of an antenna can be represented as dispersions of random signals:

$$\bar{U}_1^2 = ST_1, \quad (19)$$

$$\bar{U}_2^2 = ST_2, \quad (20)$$

where  $S$  – the antennas sensitivity;

$T_1$  and  $T_2$  – a temperature of controlled areas of an object surface.

The signals  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  through arms of the microwave switch 3 periodically arrive at one input of a hybrid tee 4. The signal from the noise generator 18 is fed to the second input of the tee through the attenuator 17, controlled by an electrical voltage of only one polarity – negative or positive one.

Since the controlled input of the attenuator is connected through the control unit 15, which is a rectangular voltage generator and a power amplifier that is connected to the output of the low-frequency amplifier 10, the attenuator opens for a time equal to the half-period of a low-frequency voltage, which is the envelope of the modulated microwave signal. In this case, the half-cycle of the low frequency is equal to the half-cycle of the switching frequency of the microwave switch 3.

In the first switching half-period, when a signal  $U_1(t) > U_2(t)$  is fed to the input of the microwave switch, the attenuator 17 opens.

Independent noise signals are summed in a hybrid tee, the sum dispersion of which can be represented in the following way:

$$\bar{U}_4^2 = K_1 (\bar{U}_1^2 + K_2 \bar{U}_3^2 + \bar{U}_5^2), \quad (21)$$

where  $K_1$  – the power transmission coefficient of the hybrid tee 4;

$K_2$  – the attenuator power transfer coefficient 17;

$U_3(t)$  – signal of generator noise 18;

$U_5(t)$  – the intrinsic noise of a one-link path of a differential radiometer, brought to the input of the amplifier 6.

In the second switching half-cycle, the signal  $U_2(t) < U_1(t)$  is supplied to the input of the microwave switch 3, the attenuator 17 is closed by a

low-frequency voltage of the opposite polarity. Therefore, the sum noise signal can be represented with dispersion:

$$\bar{U}_4'^2 = K_1(\bar{U}_2^2 + \bar{U}_3^2). \quad (22)$$

Signals  $U_4'(t)$  and  $U_4''(t)$ , that create one modulated signal, are periodically fed to mixer 7. An amplifier with a filter 8 selects a signal of difference frequency, the spectrum of which is determined by the passband of the filter.

The quadratic detector 9 receives packets of noise signals of an intermediate frequency, which can be represented as dispersion:

$$\bar{U}_6'^2 = K_3 K_1 (\bar{U}_1^2 + K_3 \bar{U}_3^2 + \bar{U}_5^2), \quad (23)$$

$$\bar{U}_6''^2 = K_3 K_1 (\bar{U}_2^2 + \bar{U}_3^2), \quad (24)$$

where  $K_3$  – a gain of the amplifier 8 in the filter bandpass.

The voltage of the envelope of the switching frequency with the amplitude is allocated at the output of the quadratic detector 9:

$$U_7 = K_1 K_3 K_4 (\bar{U}_1^2 + K_3 \bar{U}_3^2 - \bar{U}_5^2), \quad (25)$$

where  $K_4$  – a conversion coefficient of the quadratic detector 9.

An alternating voltage with an amplitude  $U_7(t)$  controls the operation of an attenuator 17 and is simultaneously rectified by a synchronous detector 11. The rectified voltage, which is fixed by indicator 13, can be written as follows:

$$U_8 = K_1 K_3 K_5 K_6 (\bar{U}_1^2 - \bar{U}_2^2 + K_2 \bar{U}_3^2) = \alpha (\bar{U}_1^2 - \bar{U}_2^2 + K_2 \bar{U}_3^2), \quad (26)$$

where  $K_5$  – the gain of amplifier 10;

$K_6$  – a conversion coefficient of a synchronous detector 11;

$\alpha = K_1 K_3 K_5 K_6$  – a resulting coefficient of a direct conversion of radiometer.

The gain of the controlled attenuator A3 is proportional to the amplitude of the low-frequency voltage  $U_7(t)$ :

$$K_2 = K_7 U_7, \quad (27)$$

where  $K_7$  – the gear ratio of a control unit 16.

If a control voltage  $U_7(t)$  is expressed through the output voltage  $U_8(t)$ , then:

$$K_2 = \frac{K_7}{K_6} U_8 = \beta U_8, \quad (28)$$

where  $\beta = \frac{K_7}{K_6}$  – a coefficient of the inverse transformation of a radiometer output voltage.

Substituting the value a transmission coefficient  $K_2$  of the controlled attenuator 17 from expression (28) into the expression (26), we get:

$$U_8 = \frac{\alpha}{1 - \alpha\beta\bar{U}_3^2} (\bar{U}_1^2 - \bar{U}_2^2). \quad (29)$$

Using expressions (29), (19) and (20), which take into account the temperature of controlled areas of an object, we finally get:

$$U'_8 = \frac{\alpha S}{1 - \alpha\beta\bar{U}_3^2} (T_1 - T_2). \quad (30)$$

A change in the sign of the measured temperature difference ( $T_1 < T_2$ ) leads to a change in the phase of the low-frequency voltage at the output of the 10 amplifier by  $180^\circ$ .

As a result, the switching half-period changes, in which the controlled attenuator 17 opens, and the noise signal from the generator 18 is summed not with the signal  $U_1(t)$ , but with the signal  $U_2(t)$  (with higher power). Thus, the operation of differential radiometer is not disturbed, and its indications will be equal to:

$$U''_8 = \frac{\alpha S}{1 - \alpha\beta\bar{U}_3^2} (T_2 - T_1). \quad (31)$$

The rectified voltage can be written in the following form because when the phase of the voltage of a switching frequency changes by  $180^\circ$ , the polarity of a rectified voltage changes at the output of a synchronous detector 11:

$$U_8 = \pm \frac{\alpha S}{1 - \alpha\beta\bar{U}_3^2} (T_1 - T_2). \quad (32)$$

Thus, the considered differential radiometer works consistently at any temperature ratio of the controlled object ( $T_1 < T_2$  or  $T_1 > T_2$ ), and the polarity of the measured voltage determines the sign of the controlled temperature difference. If the feedback coupling is absent in differential RS ( $\beta = 0$ ), then the output voltage has the form:

$$U_9 = \alpha S (T_1 - T_2). \quad (33)$$

The introduction of positive feedback ( $\beta > 0$ ) leads to the appearance of an output voltage, which is described by expression (32), and an increase in the sensitivity of the differential radiometer by a factor equal to:

$$\gamma = \frac{U_8}{U_9} = \frac{1}{1 - \alpha\beta\bar{U}_3^2}. \quad (34)$$

If a denominator of expression (34), for example, is equal to 0.01, then the sensitivity of differential radiometer will increase 100 times due to the feedback coupling.

The maximum gain in sensitivity with the condition  $([1 - \alpha \beta \bar{U}_3] \rightarrow 0)$  is limited by the possibility of auto-oscillations in the positive feedback circuit. Phase compensation chains and amplitude limiting elements are introduced to suppress auto-oscillations in control unit 17.

In practice, the fluctuation threshold of sensitivity of a differential radiometer can be reduced to  $10^{-22} \dots 10^{-23}$  W/Hz by introducing feedback coupling, which corresponds to sensitivity by temperature difference  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  K.

The usage of the considered differential radiometer allows to study the gradients of the temperature fields of biological objects in the range of their electromagnetic radiation.

#### 4. Conclusions

As a result of the analysis of the state of the problem of diagnosing the depth of thermal injury of biological tissues, it can be concluded that it is necessary to develop specialized diagnostic equipment. The fundamental possibility and prospects of using radiometric measurement methods for these purposes, that make it possible to assess the level of intrinsic electromagnetic radiation of living tissues in the microwave range, are indicated. A functional diagram of such device is provided. It provides the possibility to implement such measurements. The use of two receiving antennas ensures the elimination of the influence of radio thermal component of the radiation and the allocation of the bioinformatic component due to the activity of body cells. Comparison of bioinformatic and radio thermal components allows one to ultimately assess the depth of thermal injury.

#### References:

1. Kolkutin V.V., Shapovalov S.G., Tolmachev I.A. (2009). Otsenka tyazhesti vreda zdorov'yu pri ozhogovykh porazheniyakh [Assessment of the severity of health damage in burn injuries]. *Military Medical journal*, vol. 3, pp. 20–23. (in Russian)
2. Meilanova R.D. (2006). *Morfofunktsional'naya otsenka mikrotsirkulyatornogo rusla obolochek nekotorykh vnutrennikh organov pri ozhogovom shoke i korrektsii perfioranom* [Morphofunctional assessment of the microvasculature of the membranes of some internal organs in case of burn shock and correction with perfluorane]. (PhD Thesis), Moscow. (in Russian)

3. Zinoviev E.V., Zhilin A.V., Nesterov Yu.V. (2013). Patogeneticheskoye obosnovaniye vybora metodov mestnogo lecheniya pograniichnykh ozhogov [Pathogenetic substantiation of the choice of methods for local treatment of border burns]. *Materials of the international scientific and practical symposium "Studies in the Eurasian scientific space: modern ideas about intersystem interactions in normal and pathological conditions"*. SPb., pp. 21–26. (in Russian)
4. Paramonov B.A., Porembskiy YA.O., Yablonskiy V.G. (2000). *Ozhogi. Rukovodstvo dlya vrachey* [Burns. A guide for doctors]. St. Petersburg: Spetslit, 488 p. (in Russian)
5. Holland A.J., Martin H.C., Cass D.T. (2002). Laser Doppler imaging prediction of burn wound outcome in children // *Burns*. Feb; 28(1), pp. 11–17.
6. Soloshenko V.V., Fistal N.M., Samoilenko G.E., Nosenko V.M., Fistal E.Ya., Khachatryan S.G. (2008). *Sposib diagnostiki Glibin dermal opikiv* [A method of diagnosing the depth of dermal burns]. Patent No. 29466 UA. (in Ukrainian)
7. Kozin Y.I., Kurbanov T.A., Kravtsov O.V. (2017). *Sposib diahnostryky tyazhkosti opikovoho urazhennya* [A method of diagnosing the severity of burn lesions]. Patent No. 118540U UA. (in Ukrainian)
8. Kravtsov O.V., Kozin Yu.I., Yefimenko S.H. (2015). *Sposib ul'trazvukovoyi diahnostryky hlybyny opikiv* [Method for ultrasonic diagnosis of burn depth]. Patent No. 100841U UA. (in Ukrainian)
9. Deryabin A.I., Shankova Z.N. (1999). *Sposob diagnostiki ozhogov* [A method for diagnosing burns]. Patent No. 2143224 RU. (in Russian)
10. Minakov O.Ye., Glukhov A.A. (2004). *Sposob diagnostiki nekrozov myagkikh tkaney* [A method for the diagnosis of soft tissue necrosis]. Patent No. 2233621 U RU. (in Russian)
11. Zolotar'ova N.M., Soloshenko V.V., Fistal' E.Ya., Momot N.V. (2000). *Sposib vyznachennya ob'yemu zahyblykh tkanyn pry opikakh IV stupenya* [A method of determining the volume of dead tissue in burns of grade IV]. Patent No. 30566 A UA. (in Ukrainian)
12. Monstrey S. (2008). Assessment of burn depth and burn wound healing potential / S. Monstrey, H. Hoeksema, J. Verbelen, A. Pirayesh, Ph. Blondeel // *Burns*. Vol. 34, № 6, pp. 761–769.
13. Kislytsyn P.V., Aminev V.A., Priluchnyy M.A., Kolesov S.N. (2008). *Sposob diagnostiki glubiny ozhogovoy rany (s pomoshch'yu teplovizionnogo issledovaniya)* [A method for diagnosing the depth of a burn wound (using thermal imaging studies)]. Patent No. 2339300 RU. (in Russian)
14. Kovalenko O.M., Kovalenko A.O. (2014). *Sposib vyznachennya hlybyny urazhennya pry dermal'nykh opikakh* [A method of determining the depth of lesions in dermal burns]. Patent No. 92821 U, UA. (in Ukrainian)
15. Skripnik Y., Sitko S., Shevchenko K., Yanenko A. (2004). The development of methods of the super weak intensity radiations measurement from physical and biological objects // 10th IMEKO TC7 International Symposium on Advances of Measurement Science. June 30 – July 2, Saint-Petersburg, Russia. V. 2, pp. 311–315.
16. Kutsenko V.P., Skrypnyk YU.A., Trehubov N.F., Shevchenko K.L., Yanenko A.F. (2012). *Radiometrychnyy NVCH kontrol' vlastyivostey materialiv* [Radiometric microwave control of material properties]. Donetsk: Science and Education, 348 p. (in Ukrainian)

## CHAPTER «PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES»

### ANALYTICAL AND PRACTICAL DEVELOPMENT OF VARIANT OF MATHEMATICAL THEORY OF SHELLS OF SMALL CURVATURE OF ARBITRARY THICKNESS

Anatoly Zelensky<sup>1</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-63>

**Abstract.** The subject of theoretical and practical research is a variant of mathematical theory (MT) of transversely isotropic homogeneous shells of small curvature of arbitrary thickness and methods for solving the systems of differential equations (DE) obtained on their basis with high-order partial derivatives. The object of the study is the analytical and numerical dependences of the stress-strain state (SSS) of these shells on the mechanical-geometric parameters (MGP), the type of loading and various approximations of the MT variant in the problems of static. The purpose of this work is to summarize and extend the theoretical and numerical studies of the constructed variant MT of transversely isotropic shells of small curvature of arbitrary constant thickness at transverse static loading. The developed version of the MT takes into account all the components of the SSS shell and considers them as functions of three variable coordinates. It is based on the method of decomposition of displacements, stresses and strains in infinite mathematical series with a transverse coordinate using Legendre polynomials. The three-dimensional problem of shell elasticity theory is reduced to two-dimensional by means of the Reissner variational principle. Three-dimensional theory of elasticity DE is used to represent the components of the transverse stresses in the form of a series of Legendre

---

<sup>1</sup> Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Structural Mechanics and Materials Resistance,  
State Higher Educational Institution  
“Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Ukraine



polynomials. The boundary conditions on the front surfaces are met exactly. Representation of SSS components in the form of infinite series makes it possible to determine with high accuracy the internal SSS, which is independent of boundary effects, as well as of boundary effects – vortex and potential. Basic dependencies, DR equilibria, boundary conditions on the lateral surface are shown in general form. On this basis, dependencies and equations are obtained for different approximations, when the partial sums of the series take into account different numbers of additions. The DE system is obtained in displacements, reduced in general to a non-homogeneous DE system, which is then transformed into a defining system of equations for new functions. Different approximations are considered as special cases. The analysis and research of the obtained DE systems is performed in general form and on the basis of different approximations. Selected equations describing the boundary effect (BE) of vortex. Internal SSS and potential BE are determined by an interdependent DE system. A common general method of algebraic and operator transformations of the obtained DE systems is developed and forms of common solutions are constructed. This makes it possible to obtain general solutions of equilibrium equations by splitting high-order differential equations to small-order equations. Numerical studies of internal SSS for a wide class of MGP shells have been carried out. It is established: 1) results obtained on the basis of low approximations, including the theory of Tymoshenko-Reisner, can differ significantly from the exact ones; 2) Tymoshenko-Reisner type theory satisfactorily describes the SSS of thin shells of small curvature with low susceptibility to transverse shear at smooth external loads (which slowly change over the shell region); 3) the approximation, which takes into account the first four additions in mathematical series for tangential displacements, describes with high accuracy the SSS of thin shells and shells of medium thickness at smooth loads over a wide range of MGP changes; 4) at non-smooth loads higher approximations should be used; 5) the internal SSS of the shells depends most significantly on the smoothness and locality of the transverse load, the curvature of the middle surface, the thickness, the susceptibility to transverse shear; the MT approximation accuracy is increased with decreasing thickness, curvature, susceptibility to transverse displacements, and increasing load smoothness.

## 1. Introduction

Plate and shell structural elements are widely used in power engineering, engineering, industrial and civil engineering, and other industries. Ensuring their reliable operation requires the involvement of high-precision theories and adequate implementation techniques that take into account all components of the SSS and margins and effects.

Problem solving based on classical plate and shell theories [19, p. 3; 20, p. 22], which are subjected to local loads, have openings, a sharp change in MGP, as well as at considerable thickness and in other cases, which lead to a large gradient of SSS change, give unsatisfactory results.

Nonclassical clarifying theories [1, p. 242; 2; 5, p. 49; 10, p. 3; 16; 17, p. 52; 22, p. 195; 25; 26, p. 184; 28, p. 32; 29, p. 744], which are based on different physico-geometric hypotheses or different models of representation of deformation of these elements [1, p. 242; 13, p. 910], for a certain class of boundary value problems also cannot accurately describe the SSS of plates and shells, since finding the components of SSS with arbitrary accuracy is limited by accepted assumptions. This is due to the image of the SSS components in the form of a small number of additives (or parametric functions) [1, p. 242; 13, p. 910], which are accepted on the basis of certain physical considerations. The resulting DE systems tend to be of low order.

Solution of boundary value problems for linearly elastic plates and shells in three-dimensional formulation [9; 19, p. 3; 20, p. 22] is associated with great mathematical difficulties. These are complex three-dimensional boundary value problems of mathematical physics in which the components of the SSS are functions of three variable coordinates. Only in a limited number of cases can an analytical solution be found.

A study of recent publications shows that Tymoshenko-Reisner-type theory is used in solving problems for plates and shells [17, p. 52; 26, p. 184; 29, p. 744] or their refining variants [3; 5, p. 49; 10, p. 3; 14, p. 238; 22, p. 195]. The validity of using this type of theory to solve the relevant problems requires additional research.

Hence the relevance and purpose of the study, which is the need to build and develop new MT options and develop effective methods that would give a real opportunity to determine all components of the SSS plates and shells (functions of three variables) with high accuracy, taking into account the boundary effects.

There are different approaches to constructing theories that do not use assumptions (MT variants). SSS components are considered to be functions of three coordinates. They can be represented in the form of tensor series [12], power series [15, p. 475], mathematical series using Legendre polynomials [3; 4, p. 238; 6; 8, p. 77; 11; 21, p. 84; 23, p. 335; 24, p. 51; 30, p. 191; 31, p. 54]. Three-dimensional problems are reduced to two-dimensional by different methods: projection [6; 8, p. 77; 30, p. 191], variational [11; 21, p. 84; 23, p. 335; 24, p. 51; 31, p. 54]. There are other approaches described in [3; 7, p. 49; 11; 19, p. 3].

Reviews and development of plate and shell theories can be found, in particular in [3; 6; 9; 11; 19, p. 3; 20, p. 22].

The scientific novelty of the obtained results is the following:

1) A mathematical approach to the analytical solution of boundary value problems of transversal isotropic shells of small curvature of arbitrary thickness under static transverse loading is developed. The approach is based on the use of three-dimensional equations of the theory of elasticity, decomposition of all components of the SSS (functions of three variables) into infinite mathematical series with transverse coordinate using Legendre polynomials. Three-dimensional problems of the theory of elasticity are reduced to two-dimensional on the basis of the Reisner variational principle [27, p. 90] and interdependent equations [32, p. 67; 33, p. 92; 34, p. 137; 35, p. 496]. The boundary conditions are fulfilled precisely on the upper and lower surfaces of the shell.

2) Generalized and developed variant of MT of small curvature shells with higher approximations, which is reduced to high order DE systems, which allows to determine SSS with great accuracy.

3) Formulated boundary value problems in the general case; a unified mathematical technique of differential transformations of a system of equations of high order to convenient determining systems of differential equations of lower order is developed. Forms of general solutions are found.

4) A class of problems for shells for determining internal SSS in different approximations at different loads, slow-change and fast-varying in the region is solved; established the qualitative impact of MGP on SSS; limits of application of approximate theories depending on MGP and load type; obtained new qualitative effects and important conclusions. The validity of the method of construction of the considered variant of MT is given in

[31, p. 54], which shows the high accuracy and effectiveness of this MT option based on comparing the results for SSS with other theories.

In this work, theoretical and practical studies of the constructed variant of MT of transversely isotropic shells of small curvature of arbitrary thickness at any transverse load, which were obtained in previous works, are generalized and extended [32, p. 67; 33, p. 92; 35, p. 496].

## 2. Formulation of the problem

The purpose of the problem is theoretical and applied research of the constructed variant MT of homogeneous elastic transversal-isotropic shells of small curvature of arbitrary thickness, development on the basis of it of methods of solving DE of boundary value problems with consideration of all components of SSS and BE and analysis of numerical results obtained.

We shall consider shells of small curvature of arbitrary constant thickness  $h$  in a rectangular Cartesian coordinate system  $x, y, z$ . The dimensions of the shell in plan  $a \times b$ . The  $z$  axis is pointing up (in the direction of the bulge).

On the upper and lower surfaces of the shell there is a static transverse load  $q_1(x, y)$  and  $q_2(x, y)$ . The boundary conditions on the surfaces have the form:

$$\sigma_z(z = h/2) = -q_1(x, y); \quad \sigma_z(z = -h/2) = q_2(x, y); \quad (1)$$

$$\sigma_{xz}(z = \pm h/2) = \sigma_{yz}(z = \pm h/2) = 0. \quad (2)$$

For convenience, the transverse loading on the surfaces is depicted in the form of an algebraic sum of symmetric  $p(x, y)$  and skew-symmetric  $q(x, y)$  components. Then the boundary conditions (1) are written as follows:

$$\sigma_z(z = \pm h/2) = (\mp q(x, y) - p(x, y)) / 2, \quad (3)$$

where  $p(x, y) = q_1(x, y) - q_2(x, y)$ ,  $q(x, y) = q_1(x, y) + q_2(x, y)$ .

Conditions on the side surface of the shell can be static, kinematic or mixed.

All SSS components are considered functions of three variable coordinates. Tangential components of the displacements in expressions for the transverse angular deformations  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$ , which are neglected in the theory of thin shells, are also taken into account. The deformations are defined as follows:

$$\varepsilon_x = \partial U / \partial x + k_1 W; \quad \varepsilon_y = \partial V / \partial y + k_2 W;$$

$$\varepsilon_z = \partial W / \partial z; \quad \gamma_{xy} = \partial U / \partial y + \partial V / \partial x;$$

$$\gamma_{xz} = \partial W / \partial x + \partial U / \partial z - k'_1 U, \quad (x, y; U \rightarrow V; k'_1 \rightarrow k'_2),$$

$$(k_i = 1 / R_i; \quad k'_i = k_i, \quad i = 1, 2),$$

where  $R_1, R_2$  is the principal radii of curvature of the middle surface of the shell.

Physical dependencies for a transversal isotropic shell whose isotropy surface is parallel to the median surface are as follows:

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \nu \sigma_y) / E - \nu' \sigma_z / E', \quad (x, y); \quad \varepsilon_z = [\sigma_z - \nu'(\sigma_x + \sigma_y)] / E';$$

$$\gamma_{yx} = \sigma_{yx} / G; \quad \gamma_{xz} = \sigma_{xz} / G'; \quad \gamma_{yz} = \sigma_{yz} / G', \quad (G = E / (2(1 + \nu))),$$

where  $E, E', G, G', \nu, \nu'$  – the generally accepted mechanical characteristics of the material.

### 3. Image of the SSS components by mathematical series

**3.1. Movement components.** We represent the components of displacements in the form of infinite Fourier-Legendre series:

$$U(x, y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k(2z/h) u_k(x, y); \quad V(x, y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k(2z/h) v_k(x, y);$$

$$W(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} P_{k-1}(2z/h) w_k(x, y); \quad (4)$$

where  $u_k, v_k, w_k$ , are the unknown functions sought; they must continue to satisfy DE equilibria and boundary conditions. The representation of the SSS components as infinite rows by Legendre polynomials enables the solution to be obtained with any high precision. In practical calculations in mathematical series (4) a certain number of additions is taken. If the components of the displacement take into account the  $u_0, v_0, u_1, v_1, w_1, \dots, u_n, v_n, w_n$  components, then we call this approximation K01... n or K0-n.

**3.2. Stresses components.** The transverse stresses  $\sigma_{xz}(x, y, z), \sigma_{yz}(x, y, z)$  satisfy the boundary conditions (2) and are represented as follows:

$$\sigma_{xz}(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k(z) Q_{kx}(x, y); \quad \sigma_{yz}(x, y, z) = \sum_{k=1}^{\infty} \alpha_k(z) Q_{ky}(x, y), \quad (5)$$

where

$$\alpha_k(z) = 3(P_{k-1} - P_{k+1}) / (h(2k+1)), \quad (k = 1, 2, \dots).$$

Functions  $Q_{kx}, Q_{ky}$  are unknown. They are determined by the Reisner variational principle:

$$Q_{kx}(x, y) = \sum_{i=1,3}^{\infty} h_{ki} \frac{\partial w_i}{\partial x} + \sum_{i=0,1}^{\infty} l_{kxi} u_i, \quad (k = 1, 3, \dots);$$

$$Q_{ky}(x, y) = \sum_{i=1,3}^{\infty} h_{ki} \frac{\partial w_i}{\partial y} + \sum_{i=0,1}^{\infty} l_{kxy} v_i, \quad (k = 2, 4, \dots), \quad (6)$$

where  $h$  and  $l$  with the lower indices – MGP shell, they are different for different approximations.

The normal stresses  $\sigma_z(x, y, z)$  satisfy the boundary conditions (1), (3) and are defined as follows:

$$\sigma_z(x, y, z) = \sum_{k=0}^{\infty} \chi_k(z) \omega_k(x, y), \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} \chi_0(z) &= 1; \chi_1(z) = -3P_1 / 5 + P_3 / 10; \\ \chi_k(z) &= -3(P_{k-2} / ((2k-1)(2k+1)) - 2P_k / ((2k-1)(2k+3)) + \\ &+ P_{k+2} / ((2k+1)(2k+3))) / 2, \quad k \geq 2. \end{aligned}$$

The functions  $\omega_0(x, y), \omega_k(x, y)$  are determined from the boundary conditions (1), (3). The functions  $\omega_k(x, y)$  ( $x_{si} \rightarrow$ ) – are un-known. They are determined by the

Reisner variational principle:

$$\begin{aligned} \omega_0(x, y) &= -p(x, y) / 2; \omega_1(x, y) = q(x, y); \\ \omega_k(x, y) &= \sum_{i=2,3}^{\infty} q_{ki} w_i + \sum_{i=1,3}^{\infty} e_{ki} \phi_i + e_{kq} q, \quad (k = 3, 5, \dots); \quad (8) \\ \omega_k(x, y) &= \sum_{i=1,2}^{\infty} q_{ki} w_i + \sum_{i=0,2}^{\infty} e_{ki} \phi_i + e_{kp} p, \quad (k = 2, 4, \dots); \quad \phi_i = \partial u_i / \partial x + \partial v_i / \partial y, \end{aligned}$$

where  $e_{ki}, e_{kq}, e_{kp}$  is MGP; they have different meanings for different approximations.  $\omega_k(x, y)$  functions depend on the components in the movements with even and odd indexes. If (8) put  $k_1$  and  $k_2$  equal to zero, then we obtain the corresponding functions for the transversal isotropic plate.

Dependencies between stresses and components in displacements for the shell, taking into account the above relations (5) – (8), are represented by infinite mathematical series:

$$\begin{aligned} \sigma_{xz}(x, y, z) &= \sum_{i=0}^{\infty} P_i t_{xi}; \sigma_{yz}(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i t_{yi}; \sigma_z(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i s_{zi}; \\ \sigma_x(x, y, z) &= \sum_{i=0}^{\infty} P_i s_{xi}; \sigma_y(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i s_{yi}; \sigma_{xy}(x, y, z) = \sum_{i=0}^{\infty} P_i t_{yxi}. \end{aligned} \quad (9)$$

In (9)  $t_{xi}, t_{yi}, s_{zi}, s_{xi}, s_{yi}, t_{yxi}$  depends on the components in the displacements.

#### 4. Differential equilibrium equations and boundary conditions

##### 4.1. Differential equilibrium equations in the approximation K0-n.

The DE equilibrium system and boundary conditions are derived from the Reisner variational equation. We are leading a system of DE equilibria and boundary conditions in the approximation K0-n.

System of DE of equilibrium transtropic shell of small curvature:

$$\sum_{k=0}^n (D_{u_{i,k}} u_k + D_{v_{i,k}} v_k) + \sum_{k=1}^n D_{w_{i,k}} w_k = D_{i_p} p(x, y) + D_{i_q} q(x, y), \quad (i = 1, 2, \dots, 3n + 2), \quad (10)$$

where  $D_{u_{i,k}}$ ,  $D_{v_{i,k}}$ ,  $D_{w_{i,k}}$  is the differential operators not higher than the second order,  $D_{i_p}$ ,  $D_{i_q}$  is the differential operators not higher than the first order. Equally marked operators in different approximations are different.

**4.2. Boundary conditions in the K0-n approximation.** To obtain the boundary conditions, we decompose the load  $X_v, Y_v, Z_v$  acting on part  $\Gamma_1$  of the lateral surface  $\Gamma$  of the shell into series by Legendre polynomials in the transverse coordinate:

$$X_v(z, s) = \sum_{i=0}^n P_i(2z/h) x_{si}(s), \quad (11)$$

where functions  $x_{si}$  are defined on part  $S_1$  of the contour  $S$  of the shell ( $x, y \in S_1$ ):

$$x_{si}(x, y) = \frac{2i+1}{h} \int X_v(x, y, z) P_i(2z/h) dz, \quad (X_v \rightarrow Y_v \rightarrow Z_v, \quad x_{si} \rightarrow y_{si} \rightarrow z_{si}).$$

Let us represent the components of the displacement  $U_{r_2}(x, y, z)$ ,  $V_{r_2}(x, y, z)$ ,  $W_{r_2}(x, y, z)$  given on part  $\Gamma_2$  of the lateral surface ( $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ ) of the shell in the form of finite sums:

$$U_{r_2}(x, y, z) = \sum_{j=0}^n P_j(2z/h) u_{jr_2}(x, y); \quad V_{r_2}(x, y, z) = \sum_{j=0}^n P_j(2z/h) v_{jr_2}(x, y); \quad (12)$$

$$W_{r_2}(x, y, z) = \sum_{j=1}^n P_j(2z/h) w_{jr_2}(x, y),$$

where the functions  $u_{jr_2}(x, y)$ ,  $v_{jr_2}(x, y)$ ,  $w_{jr_2}(x, y)$  are defined on part  $S_2$  of the contour  $S$  shell ( $x, y \in S_2$ ;  $S_1 + S_2 = S$ ):

$$u_{jr_2}(x, y) = \frac{2j+1}{h} \int_z U_{r_2}(x, y, z) P_j\left(\frac{2z}{h}\right) dz, \quad (u_{jr_2} \Rightarrow v_{jr_2}, U_{r_2} \rightarrow V_{r_2}), \quad (j = 0, 1, \dots, n); \quad (13)$$

$$w_{jr_2}(x, y) = \frac{2j-1}{h} \int_z W_{r_2}(x, y, z) P_{j-1}\left(\frac{2z}{h}\right) dz, \quad (j = 0, 1, \dots, n).$$

The boundary conditions are obtained from the Reisner variation equation:

$$\int_{(s)} \left\{ \sum_{j=0}^n \frac{h}{(2j+1)} ((s_{xj} l_x + t_{yxj} l_y - x_{sj}) \delta u_j + (t_{yxj} l_x + s_{yj} l_y - y_{sj}) \delta v_j) + \sum_{j=0}^{n-1} \frac{h}{(2j+1)} (t_{xj} l_x + t_{yj} l_y - z_{sj}) \delta w_{j+1} \right\} ds = 0, \quad (14)$$

where  $l_x, l_y$  – is the guide cosines normal to the lateral surface.

Equation (14) with respect to (11) – (13) yields different boundary conditions in the approximation K0-n. Here are some of them.

**1) Boundary conditions in displacements.** Only the displacement components  $U_r(x, y, z), V_r(x, y, z), W_r(x, y, z)$  . are known on the side surface of the shell. Boundary conditions:

$$u_j(x, y) = u_{jr}(x, y); v_j(x, y) = v_{jr}(x, y), (j = 0, 1, \dots, n); \quad (15)$$

$$w_j(x, y) = w_{jr}(x, y), (j = 1, \dots, n); x, y \in S.$$

**2) Boundary conditions in stresses.** Only the external load  $X_v, Y_v, Z_v$  is set on the side surface  $\Gamma$  . Then we have the following boundary conditions:

$$s_{xj}(x, y) l_x + t_{yxj}(x, y) l_y = x_{sj}(x, y); t_{yxj}(x, y) l_x + s_{yj}(x, y) l_y = y_{sj}(x, y), \quad (16)$$

$$(j = 0, 1, \dots, n); t_{xj}(x, y) l_x + t_{yj}(x, y) l_y = z_{sj}(x, y), (j = 0, 1, \dots, n-1), x, y \in S,$$

where  $s_{xj}, s_{yj}, t_{yxj}, t_{xj}, t_{yj}$  – functions from  $u_j, v_j, w_j$  .

## 5. Basic dependences and equations in the approximation K0-n

We assume that  $n$  is an odd integer. The components of displacements and stresses are expressed by partial sums of infinite series.

**Movement components:**

$$U(x, y, z) = \sum_{k=0}^n P_k(2z/h) u_k(x, y); V(x, y, z) = \sum_{k=0}^n P_k(2z/h) v_k(x, y); \quad (17)$$

$$W(x, y, z) = \sum_{k=1}^n P_{k-1}(2z/h) w_k(x, y).$$

**Stresses components:**

$$\sigma_{xz}(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+1} P_i t_{xi}; \sigma_{yz}(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+1} P_i t_{yi}; \sigma_z(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i s_{zi}; \quad (18)$$

$$\sigma_x(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i s_{xi}; \sigma_y(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i s_{yi}; \sigma_{xy}(x, y, z) = \sum_{i=0}^{n+2} P_i t_{yxi}.$$



To approximate K0-5, functions  $t_{xi}, t_{yi}, \dots, t_{yxi}$  are given in [35, p. 496].

**Differential equilibrium equations.** The DR equilibrium system has the form (10). It has order  $(6n + 4)$ .

**Boundary conditions.** The boundary conditions are determined by equations (11) – (16).

The main dependencies and equations are obtained in the approximations K01, K0-3, K0-5 from (10) – (18) if we put  $n = 1, n = 3, n = 5$  in them. The order of systems of differential equations of equilibrium is  $(6n + 4)$ .

It is shown analytically that the differential matrix in all approximations is symmetric. Expressions for system operators in the approximation K0-5 are given in [32, p. 67].

## 6. Transformation of DE systems. Forms of general solutions

DE systems for the shell of small curvature of arbitrary thickness in all approximations are not divided into separate systems that describe symmetric and oblique deformation. If  $k'_1$  and  $k'_2$  are taken into account, these systems are not divided into the equation of vortex and potential BE with internal SSS.

Additional studies show that for shells with parameters  $R_{1,2} / a; a \geq 2; a \geq b$  in the equations can be put  $k'_1 = k'_2 = 0$ . Then, a system of vortex BE equations and a system describing the internal SSS with potential BE are singled out from these systems. Hereinafter we shall consider  $k'_1 = k'_2 = 0$ .

**6.1. The approximation K0-n (n-odd).** Consider the transformation of the system DR (10) in the general case in the approximation K0-n.

The vortex BE is described by a system of order  $2n$ , which is divided into two separate systems. One order system  $(n + 1)$  determines the BE at skew symmetric deformation:

$$\sum_{j=1,3}^n H_{c i j} \psi_j = 0, \quad (i = 1, 3, \dots, n). \quad (19)$$

The other system is of the order  $(n-1)$  and determines the BE in symmetric deformation:

$$\sum_{j=2,4}^{n-1} H_{s i j} \psi_j = 0, \quad (i = 2, 4, \dots, n-1); \quad \psi_j = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x. \quad (20)$$

In (19) and (20)  $H_{c i j}, H_{s i j}$  the differential operators are not higher than the second order, which depends on the MGP, except for the curves.

Therefore, the curvature of the shell does not affect the eddy BE, and the equations coincide with the equations for the plates.

After some algebraic and differential transformations of system (10), a 24-order DE system with partial derivatives with respect to functions  $u_0, v_0, w_1, \dots, w_n$  is obtained, which determines the interdependent internal SSS and potential BE:

$$P_{i1}u_0 + P_{i2}v_0 + \sum_{k=3,4}^{n+2} P_{ik}w_{k-2} = P_{iq}q + P_{ip}p, \quad (i = 1, 2, \dots, n+2), \quad (21)$$

where  $P$  with indices are differential operators.

System (21) is not divided into independent systems of internal SSS and potential BE. This means that the curvatures of the shell affect the interdependence of the internal SSS and the potential BE. For the plates of the system of equations of internal SSS and potential BE are separated [31, p. 84; 32, p. 54].

The systems of solving equations (19) – (21) are reduced to more convenient systems of DE.

DE (19) is reduced to one DE (order  $(n+1)$ ) with respect to the new function  $\psi_c(x, y)$ :

$$H_c \psi_c(x, y) = 0, \quad (22)$$

where  $H_c$  is the differential determinant of system (19):

$$H_c = (\nabla^2 - a_1)(\nabla^2 - a_3) \dots (\nabla^2 - a_n), \quad a_i \quad (i = 1, 3, \dots, n) \text{—MGP.}$$

The general solution of DE (22) is defined as:

$$\psi_c(x, y) = \sum_{i=1,3}^n \psi_{ci}(x, y), \quad (23)$$

where  $\psi_{ci}(x, y)$  are the general solutions of DE Helmholtz:

$$(\nabla^2 - a_i)\psi_{ci}(x, y) = 0, \quad (i = 1, 3, \dots, n). \quad (24)$$

The general solutions of system (19), taking into account (22) – (24), will be as follows:

$$\psi_j(x, y) = H_{c1j} \psi_c(x, y), \quad (j = 1, 3, \dots, n), \quad (25)$$

where  $H_{c1j}$  is the adjuncts of the differential determinant of system (19).

Similarly, system (20) is reduced to one DE of order with respect to the new function  $\psi_s(x, y)$ :

$$H_s \psi_s(x, y) = 0, \quad (26)$$

where  $H_s$  is the differential determinant of system (20):

$$H_s = (\nabla^2 - b_2)(\nabla^2 - b_4) \dots (\nabla^2 - b_{n-1}); \quad b_i \quad (i = 2, 4, \dots, n-1) - \text{MGP.}$$

Numerical studies show that in the approximations K01, K0-3, K0-5 the  $a_i, b_i$  parameters are positive numbers.

The general solution of DE (26) will be:

$$\psi_s(x, y) = \sum_{i=2,4}^{n-1} \psi_{s,i}(x, y), \quad (27)$$

where  $\psi_{s,i}(x, y)$  are the general solutions of DE Helmholtz:

$$h/a = 0, 2; R_{1,2}/a = 5; G'/G = 0, 1; E'/E = 0, 1; v' = 0, 03; v = 0, 3; m = n = 1. \quad (28)$$

The general solutions of system (20) taking into account (26) – (28) will take the form:

$$\psi_j(x, y) = H_{s1j} \psi_s(x, y), \quad (j = 2, 4, \dots, n-1), \quad (29)$$

where  $H_{s1j}$  is the adjuncts of the differential determinant of the system (20).

The dependencies (25) and (29) are the forms of common solutions of DE vortex BE.

We reduce the system DE (21) to the system of relatively new required functions  $D_i(x, y)$ . To do this, we represent the components of the operator component of the displacement through these functions:

$$\begin{aligned} u_0(x, y) &= \sum_{i=1,2}^{n+2} P_{i1}^0 D_i(x, y); \quad v_0(x, y) = \sum_{i=1,2}^{n+2} P_{i2}^0 D_i(x, y); \\ w_{k-2}(x, y) &= \sum_{i=1,2}^{n+2} P_{ik}^0 D_i(x, y), \quad (k = 3, 4, \dots, n+2), \end{aligned} \quad (30)$$

where  $P_{ik}^0$  is the adjuncts of system (21). To determine the required functions  $D_i(x, y)$  we obtain a system of DE of order  $4(n+1)$ :

$$P D_i(x, y) = P_{iq} q(x, y) + P_{ip} p(x, y), \quad (i = 1, 2, \dots, n+2), \quad (31)$$

in which  $P$  is the differential determinant of system (21).

The general solutions of system (31) will appear as:

$$D_1(x, y) = D_{10}(x, y) + D_{1,r}(x, y); \quad D_i(x, y) = D_{i,r}(x, y), \quad (i = 2, 3, \dots, n+2), \quad (32)$$

where  $D_{10}(x, y)$  is the general solution of the homogeneous equation  $PD_1(x, y) = 0$ ;

$D_{1,r}(x, y), \dots, D_{(n+2),r}(x, y)$  – partial solutions of inhomogeneous DE (31).

Taking into account (30) and (32) we obtain:

$$u_0(x, y) = P_{11}^0 D_{10}(x, y) + \sum_{i=1}^{n+2} P_{i1}^0 D_{i,r}(x, y); \quad v_0(x, y) = P_{12}^0 D_{10}(x, y) + \sum_{i=1}^{n+2} P_{i2}^0 D_{i,r}(x, y);$$

$$w_{k-2}(x, y) = P_{ik}^0 D_{10}(x, y) + \sum_{i=1}^{n+2} P_{ik}^0 D_{i,r}(x, y). \quad (33)$$

Formulas (33) determine the forms of the general solution of the system (21) of internal SSS and potential BE. Components  $u_1, v_1, u_2, \dots, u_n, v_n$  are determined from the system of equilibrium DE (10). The stress components are given by formulas (18).

The equilibrium system of DE (10) can be solved analytically by methods of double and single trigonometric series depending on the boundary conditions of the shell contour [33, p. 92], by the method of perturbation of the geometric parameters of the shell [34, p. 137], by methods of integral transformations. The perturbation method leads to the solution of the recurrent sequence of two DE systems, the right parts of which in each approximation to a small parameter depend on the solution in the previous approximation. The perturbation method can also be applied to the DE (31) determination system since the vortex equations BE (22) and (26) are solved directly. Integral conversion methods are also better applied to system (31) than to DE (10). This makes it much easier to find common solutions.

**6.2. The approximations K01, K0-3, K0-5.** We obtain all transformed equations from equations (10), (19) – (33) if we put in them  $k = 1$  (in approximation K01),  $k = 3$  (in approximation K0-3),  $k = 5$  (approximation K0-5). The SSS components for these approximations will be determined by formulas (18) with the corresponding  $k$ . Expanded ratios and basic equations to approximate K0-5 are given in [32, p. 67].

## 7. Numerical results and their analysis

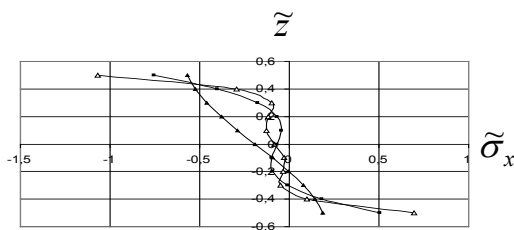
Based on the obtained systems of differential equations for different approximations (19) – (21), we investigate the SSS of transstropic shells ( $a \times b \times h$ ) of small curvature at boundary conditions Navier from the effect of transverse loading

$$q(x, y) = q_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}, \quad p(x, y) = p_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b}$$

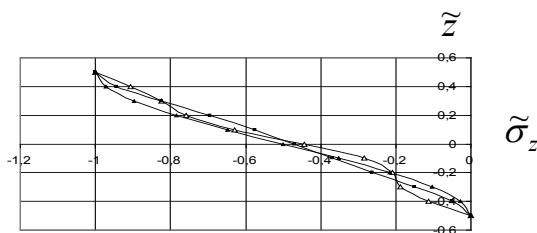
( $q_{mn}, p_{mn} - \text{const}$ ) for different MGP  $a / h, G' / G, E' / E, \nu', \nu, R / a, k'_{12}, m, n$  at  $p_{mn} / q_{mn} = 0, p_{mn} / q_{mn} = 1$ . The internal SSS components were found by classical theory and by the approximations K01, K0-3, K0-5, using the corresponding dependencies for these approximations. Based on the

developed algorithms, we investigate the SSS of the square in the plane of the transtropic shells of different thickness at smooth and non-smooth loads for a wide class of MGP. This provided an in-depth analysis of the impact of MGP and the type of load on SSS, as well as the convergence of results and their accuracy, depending on the approximation of the MT variant. Hereafter  $\tilde{\sigma}_x = \sigma_x / q$ ;  $\tilde{W} = WE / (qh)$ ;  $\tilde{z} = z / h$ . SSS at skew-load is characterized by the parameter  $p_{mn} / q_{mn} = 0$ , and when loaded on the upper face plane – by the parameter  $p_{mn} / q_{mn} = 1$ ;  $\Delta$  with lower indices means a corresponding difference in percentages. The lines in the graphs correspond to:  $\triangle$  – is the approximation of K0-5 (or K135);  $\blacksquare$  – K0-3 (or K13);  $\blacktriangle$  – K01 (or K1);  $-\cdot-\cdot-$  – Classical Theory (CT).

Figures 1,2 show the graphs of the dependencies of the SSS components at  $R_{1,2} / a = 5$ ;  $G' / G = 0,1$ , which characterize the nonlinearity of the SSS and the difference between the results of the approximations. The following results are for  $E' / E = 1$ ,  $\nu' = \nu = 0,3$ .



**Figure 1.** The stress component  $\tilde{\sigma}_x$  ( $h / a = 0,1$ ;  $m = n = 9$ ;  $p_{mn} / q_{mn} = 1$ )



**Figure 2.** The stress component  $\tilde{\sigma}_z$  ( $h / a = 0,1$ ;  $m = n = 9$ ;  $p_{mn} / q_{mn} = 1$ ).

Tables 1-4 characterize the components of the SSS depending on the approximation, the MGP, the type of load, and the consideration of

the curvatures ( $k'_{1,2} = k_{1,2}$ ) in the transverse shear deformations. In the table. 1, 2  $\Delta$  characterizes the effect of  $k'_{1,2}$  curvature on SSS. A practical analysis of the series convergence for the SSS components is performed. Additional numerical studies show a high convergence of results with a skew-symmetric, slowly varying loading region even for thick isotropic ( $h/a = 0,5$ ;  $R_{1,2}/a = 5$ ;  $\nu = 0,3$ ) shells.

Table 1

**Components of the SSS of the transtropic shell**

( $h/a = 0,2$ ;  $a = b$ ;  $R_{1,2}/a = 5$ ;  $G'/G = 0,1$ ;  $m = n = 1$ ;  $p_{mn}/q_{mn} = 1$ ;  
 $k'_{1,2} \neq 0 / k'_{1,2} = 0$ )

$z/h$	K01	K0-3	K0-5	$\Delta \%$	$\Delta_{31} \%$	$\Delta_{53} \%$
	$\tilde{\sigma}_x$					
-0,5	3,479 3,444	4,844 4,832	4,841 4,832	0,19	28,2 -	0,06 -
$\tilde{W}$	$\tilde{W}$					
-0,5	-52,17 -51,91	-50,83 -50,59	-49,52 -49,28	0,48	2,64 -	2,65 -

Table 2

**SSS components of the isotropic shell ( $z/h = 0,5$  ;**

$h/a = 0,5$ ;  $a = b$ ;  $R_{1,2}/a = 29/40$ ;  $G'/G = 1$ ;  $m = n = 1$ ;  $p_{mn}/q_{mn} = 0$ ;  
 $k'_{1,2} \neq 0 / k'_{1,2} = 0$ )

SSS	CT	K01	K0-3	K0-5	$\Delta \%$	$\Delta_{1k} \%$	$\Delta_{31} \%$	$\Delta_{53} \%$
$\tilde{\sigma}_x$	-0,7789	-0,9052 -0,9038	-0,9740 -0,9091	-0,9921 -0,9267	6,59	14,0 13,8	7,06 0,58	1,82 1,90
$\tilde{W}$	-0,3696	-0,8225 -0,6840	-0,7379 -0,5982	-0,7485 -0,6118	18,3	55,1 46,0	11,5 14,3	1,42 2,22

To determine the SSS for non-smooth loads on the shell region, higher approximations (K0-5 and higher) should be taken into account. For thick transtropic shells ( $h/a \geq 0,5$ ;  $R_{1,2}/a \leq 1$ ), the dependence of the transverse shear deformations on the curvatures must be taken into account, and symmetrical components in the displacement components should be taken into account in the skew-symmetrical loading (Table 3) (the difference is characterized by the magnitude  $\Delta'$ ). Transverse crimping can significantly

Table 3

**Components of the SSS of the transtropic shell**

( $h/a = 0,5$ ;  $a = b$ ;  $R_{1,2}/a = 29/40$ ;  $G'/G = 0,1$ ;  $m = n = 1$ ;  $k'_{1,2} \neq 0$ ;  $p_{mn}/q_{mn} = 0$ )

$\frac{z}{h}$	K01	K013 K0-3 $\Delta'$ %	K0135 K0-5 $\Delta'$ %	K01	K013 K0-3 $\Delta'$ %	K0135 K0-5 $\Delta'$ %
	$\tilde{\sigma}_x$			$\tilde{W}$		
0,5	-0,874	-1,052 -0,939 12,0	-1,129 -1,013 11,5	-1,690	-1,726 -1,562 10,5	-1,719 -1,568 9,63

Table 4

**Components of the SSS of the transtropic shell**

( $z/h = -0,5$ ;  $h/a = 0,1$ ;  $a = b$ ;  $R_{1,2}/a = 5$ ;  $G'/G = 0,1$ ;  $m = n = 9$ ;  
 $k'_{1,2} \neq 0$ ;  $p_{mn}/q_{mn} = 0 / p_{mn}/q_{mn} = 1$ )

SSS	K01	K0-3	K0-5	$\Delta_{pq}\%$	$\Delta_{31}\%$	$\Delta_{53}\%$	$\Delta_{51}\%$
$\tilde{\sigma}_x$	0,3595 0,1868	0,6126 0,5042	0,8815 0,6982	26,3	41,3 63,0	30,5 27,8	59,2 73,2
$\tilde{W}$	-1,979 -1,977	-1,886 -1,659	-1,852 -1,586	16,8	4,93 19,2	1,84 4,60	3,94 24,7

affect the SSS not only for thick, but also for shells of medium thickness ( $h/a = 0,1 \div 0,2$ ), especially for non-smooth loads on the shell region (Table 4). The magnitude of  $\Delta_{pq}$  characterizes the difference between the results when the transverse compression is taken into account and not taken into account.

Tables 5-7 compare the components of the SSS for the shells with the exact components for the respective plates ( $\Delta_{po}$  indicates the difference between the results for the plates and the shells with respect to the plates). The bold text in these tables shows MGP and loads, at which the shells of small curvature can be replaced by corresponding plates with an accuracy of up to 4%.

For isotropic shells, the discrepancy with the plates is less than 3.84%. This makes it possible to replace the calculation of shells in some cases with appropriate plates.

Table 5

$\tilde{\sigma}_x$  values for isotropic shells and plates

( $G' / G = 1$ ;  $E' / E = 1$ ;  $\nu' = \nu = 0,3$ ;  $m = n = 1$ ;  $k'_{1,2} \neq 0$ ;  $p_{mn} / q_{mn} = 0 / p_{mn} / q_{mn} = 1$ )

$\frac{h}{a}$	$\frac{z}{h}$	Plate (The exact solution)	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 10$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 20$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 40$	$\Delta_{po}$ %
$\frac{1}{3}$	0,5	-1,995 -2,125	-2,040 -2,128	2,26 0,14	-2,019 -2,127	1,20 0,09	<b>-2,007</b> <b>-2,126</b>	<b>0,60</b> <b>0,05</b>
	-0,5	1,995 1,865	<b>1,936</b> <b>1,766</b>	<b>2,96</b> 5,31	<b>1,966</b> <b>1,816</b>	<b>1,45</b> <b>2,63</b>	<b>1,981</b> <b>1,840</b>	<b>0,70</b> <b>1,34</b>
$\frac{1}{5}$	0,5	-5,148 -5,244	<b>-5,309</b> <b>-5,330</b>	<b>3,13</b> <b>1,64</b>	<b>-5,239</b> <b>-5,298</b>	1,77 1,03	-5,196 -5,274	0,93 0,57
	-0,5	5,148 5,052	4,913 4,749	4,56 6,00	<b>5,040</b> <b>4,909</b>	<b>2,10</b> <b>2,83</b>	<b>5,096</b> <b>4,983</b>	<b>1,01</b> <b>1,37</b>
$\frac{1}{10}$	0,5	-20,02 -20,10	<b>-20,82</b> <b>-20,75</b>	<b>4,00</b> <b>3,23</b>	<b>-20,54</b> <b>-20,55</b>	<b>2,60</b> <b>2,24</b>	<b>-20,29</b> <b>-20,33</b>	<b>1,35</b> <b>1,14</b>
	-0,5	20,02 19,94	18,00 17,79	10,1 10,8	19,10 18,95	4,60 4,96	<b>19,57</b> <b>19,45</b>	2,25 2,46

Table 6

$\tilde{\sigma}_x$  values for transtropic shells and plates

( $G' / G = 0,1$ ;  $E' / E = 1$ ;  $\nu' = \nu = 0,3$ ;  $m = n = 1$ ;  $k'_{1,2} \neq 0$ ;  $p_{mn} / q_{mn} = 0 / p_{mn} / q_{mn} = 1$ )

$\frac{h}{a}$	$\frac{z}{h}$	Plate (The exact solution)	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 10$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 20$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 40$	$\Delta_{po}$ %
$\frac{1}{3}$	0,5	-3,190 -3,299	-3,360 <b>-3,393</b>	5,33 <b>2,85</b>	-3,278 -3,349	2,76 1,52	<b>-3,226</b> <b>-3,316</b>	<b>1,13</b> <b>0,52</b>
	-0,5	3,190 3,081	2,871 2,702	10,0 12,3	3,031 2,890	4,98 6,20	<b>3,102</b> <b>2,978</b>	<b>2,76</b> <b>3,34</b>
$\frac{1}{5}$	0,5	-6,593 -6,685	-6,981 -6,973	5,89 4,31	<b>-6,823</b> <b>-6,866</b>	<b>3,49</b> <b>2,71</b>	-6,715 -6,783	1,85 1,47
	-0,5	6,593 6,502	5,921 5,748	10,2 11,6	6,285 6,150	4,67 5,41	<b>6,445</b> <b>6,332</b>	<b>2,24</b> <b>2,61</b>
$\frac{1}{10}$	0,5	-21,57 -21,65	-22,75 -22,67	5,47 4,71	<b>-22,41</b> <b>-22,41</b>	<b>3,89</b> <b>3,51</b>	<b>-22,05</b> <b>-22,09</b>	<b>2,23</b> <b>2,03</b>
	-0,5	21,57 21,49	18,62 18,41	13,7 14,3	20,28 20,12	5,98 6,38	<b>20,98</b> <b>20,86</b>	2,74 2,93



Table 7

**$\tilde{W}$  values for transtropic shells and plates**

( $G' / G = 0,1$ ;  $E' / E = 1$ ;  $\nu' = \nu = 0,3$ ;  $m = n = 1$ ;  $k'_{1,2} \neq 0$ ;  $p_{mn} / q_{mn} = 0 / p_{mn} / q_{mn} = 1$ )

$\frac{h}{a}$	$\frac{z}{h}$	Plate (The exact solution)	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 10$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 20$	$\Delta_{po}$ %	Shell $\frac{R_{1,2}}{a} = 40$	$\Delta_{po}$ %
$\frac{1}{3}$	<b>0,5</b>	<b>-15,56</b>	<b>-15,25</b>	<b>1,99</b>	<b>-15,47</b>	<b>0,58</b>	-15,54	0,06
		<b>-15,79</b>	<b>-15,09</b>	<b>4,43</b>	<b>-15,50</b>	<b>1,84</b>	-15,67	0,76
$\frac{1}{5}$	0,5	-15,56	-15,42	0,90	-15,54	0,13	-15,55	0,06
		-15,34	-14,80	3,52	-15,13	1,37	-15,26	0,52
$\frac{1}{5}$	0,5	-55,15	-53,87	2,32	-54,78	0,67	-55,04	0,20
		-55,38	-53,29	3,77	-54,60	1,41	-55,06	0,58
$\frac{1}{10}$	<b>-0,5</b>	<b>-55,15</b>	<b>-54,22</b>	<b>1,69</b>	<b>-54,96</b>	<b>0,34</b>	<b>-55,13</b>	<b>0,04</b>
		<b>-54,92</b>	<b>-53,18</b>	<b>3,17</b>	<b>-54,32</b>	<b>1,09</b>	<b>-54,70</b>	<b>0,40</b>
$\frac{1}{10}$	0,5	-432,8	-414,7	4,18	<b>-428,0</b>	<b>1,11</b>	<b>-431,5</b>	<b>0,30</b>
		-433,0	-411,9	4,87	<b>-426,6</b>	<b>1,48</b>	<b>-430,9</b>	<b>0,48</b>
$\frac{1}{10}$	-0,5	-432,8	<b>-416,0</b>	<b>3,88</b>	<b>-428,6</b>	<b>0,97</b>	<b>-431,8</b>	0,23
		-432,5	-412,7	4,58	<b>-426,8</b>	<b>1,32</b>	<b>-430,8</b>	0,39

## 8. Conclusions

Based on studies of the MT variant of transversely isotropic shells of small curvature of arbitrary thickness, the following conclusions are obtained.

Derived DE systems and boundary conditions in general form and as special cases for different approximations. The obtained DE systems take into account the shear deformations of the transverse shear, which can significantly affect the SSS of the shells. The SSS of such shells in each approximation is determined by the solution of systems of interdependent differential equations with partial derivatives.

Forms of general solutions of the DE equilibrium system are constructed in arbitrary approximation. Approaches K01, K0-3, K05 are considered as special cases. Highlighted equations that describe vortex BE. Internal SSS and potential BE in the K0-n ( $n$  odd,  $n \geq 3$ ) approximations are determined by the interdependent DE systems.

Analytical solutions of boundary value problems of MT variant in double trigonometric series are constructed. The boundary value problems for determining the internal SSS for a wide class of MGP in different approximations are solved. The convergence of results is generally improved

by reducing the thickness, the shearability of the material in shear, and by reducing the curvature of the middle surface.

SSS in the scope of the BE, with non-smooth and local loads, should be determined by high MT approximations. The results obtained from low approximations may differ significantly from the exact ones. Timoshenko-Reisner-type theories satisfactorily describe the SSS of thin, low-curved shells with low transverse shear at smooth loads. The K0-3 approximation describes the SSS of thin shells and medium-thickness shells with high accuracy over a wide range of MGP variations. At non-smooth loads of approximation K01, K0-3 can give unsatisfactory results not only for medium thickness shells, but also for thin shells. This indicates the need to use higher approximations.

The internal SSS of the shells depends essentially on the nature of the variability of the transverse load, the curvature of the middle surface, the thickness, and the susceptibility to transverse displacement. The accuracy of the approximations increases with decreasing thickness, curvature, lateral displacement, and increasing the transverse smoothness.

The constructed variant of MT of transversely isotropic shells of small curvature of arbitrary thickness makes it possible to solve different classes of boundary value problems with high accuracy based on the analysis of the convergence of numerical results.

### **References:**

1. Altenbach H., Eremeyev V.A. (2009). On the linear theory of micropolar plates. *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 89, no. 4, pp. 242–256.
2. Ambartsumyan S.A. (1974). *Obshchaya teoriya anizotropnykh obolochek* [General Theory of Anisotropic Shells]. Moscow: Science. (in Russian)
3. Burak Ja.J., Rudavskyj Ju.K., Sukhoroljskyj M.A. (2007). *Analichna mekhanika lokaljno navantazhenykh obolonok* [Analytical mechanics of locally loaded shells]. Lviv: Intellect-West. (in Ukrainian)
4. Cicala (1959). Sulla teoria elastica della plate sottile. *Giorn genio Civile*, vol. 97, no. 4, pp. 238–256.
5. Daouadj T.H., Adim B. (2017). Mechanical behaviour of FGM sandwich plates using a quasi-3D higher order shear and normal deformation theory. *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 61, no. 1, pp. 49–63.
6. Gulyaev V.I., Bazhenov V.A., Lizunov P.P. (1978). *Neklassicheskaya teoriya obolochek i ee prilozhenie k resheniyu inzhenernykh zadach* [Nonclassical theory of shells and its application to solving engineering problems]. Lviv: Lviv University. (in Ukrainian)

7. Grigorenko A. Ya., Bergulev A. S., Yapemchenko S. N. (2011). On napryazhenno-deformirovannom sostoyanii ortotropnykh tolstostennykh pryamougol'nykh plastin [On the stress-strain state of orthotropic thick-walled rectangular plates]. *Reports of NAS of Ukraine*, no. 9, pp. 49–55.
8. Jaiani G. (2015). Differential hierarchical models for elastic prismatic shells with microtemperatures, *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 95, no. 1, pp. 77–90.
9. Jemielita G. (1991). Plate Theory Meanders. Warsaw: Publisher of the Warsaw University of Technology.
10. Kazemi M. (2018). Hygrothermoelastic buckling response of composite laminates by using modified shear deformation theory. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 56, no. 1, pp. 3–14.
11. Khoma I. Yu. (1986). *Obobshchennaya teoriya anizotropnykh obolochek* [Generalized theory of anisotropic shells]. Kiev: Naukova Dumka. (in Ukrainian)
12. Kil'chevskiy N. A. (1963). *Osnovy analiticheskoy mekhaniki obolochek* [Fundamentals of analytical shell mechanics]. Kiev: Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. (in Ukrainian)
13. Kulikov G. M., Plotnikova S. V. (2012). On the use of sampling surfaces method for solution of 3D elasticity problems for thick shells, *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 92, no. 11-12, pp. 910–920.
14. Kushnir R. M., Marchuk M. V., Osadchuk V. A. (2006). Nelinijni zadachi statyky i dynamiky podatlyvykh transversal'nym deformacijam zsuvu ta stysnennja plastyn i obolonok [Nonlinear Problems of Static and Dynamics Susceptible to Transverse Shear and Compression of Plates and Shells]. *Aktual'nye problemy mekhaniki deformiruemogo tverdogo tela* [Actual problems of the mechanics of a deformable solid]. Donetsk: Donetsk University, pp. 238–240. (in Ukrainian)
15. Libresku L. I. (1964). K teorii anizotropnykh uprugikh obolochek i plastinok [To the theory of anisotropic elastic shells and plates]. *Engineering Journal*, vol. 4, no. 3, pp. 475–485.
16. Lo K. N., Christensen R. M., Wu E. M. (1977). A high-order theory of plate deformation-Part I: Homogeneous plates. *J. Appl. Mech.*, vol. 44, pp. 663–668.
17. Naghdi P. M. (1957). On the theory of thin elastic shell. *Quart. J. Appl. Math.*, vol. 14, no. 4, pp. 52–57.
18. Nemish Yu. N. (2000). *Razvitie analiticheskikh metodov v trekhmernykh zadachakh statiki anizotropnykh tel* [Development of analytical methods in three-dimensional problems of the statics of anisotropic bodies]. *Applied mechanics*, vol. 36, no. 2, pp. 3–38.
19. Nemish Yu. N., Khoma I. Yu. (1991). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie netonkikh obolochek i plastin. Obobshchennaya teoriya [Stress-strain state of non-thin shells and plates. Generalized theory]. *Applied mechanics*, vol. 29, no. 11, pp. 3–27.
20. Piskunov V. G., Rasskazov A. O. (2002). Razvitie teorii sloistykh plastin i obolochek [The development of the theory of laminated plates and shells]. *Applied mechanics*, vol. 38, no. 2, pp. 22–57.
21. Plekhanov A. V., Prusakov A. P. (1976). Ob odnom asimptoticheskom metode postroeniya teorii izgiba plastin sredney tolshchiny [On an asymptotic method for

constructing a theory of bending of plates of medium thickness]. *Solid mechanics*, vol. 3, pp. 84–90.

22. Polizzotto C. (2018). A class of shear deformable isotropic elastic plates with parametrically variable warping shapes. *Journal of applied mathematics and mechanics*, vol. 98, no. 2, pp. 195–221.

23. Ponyatovskiy V.V. (1962). K teorii plastin sredney tolshchiny [To the theory of medium-thickness plates]. *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 24, no. 2, pp. 335–341.

24. Prusakov A.P. (1993). O postroenii uravneniy izgiba dvenadtsatogo poryadka dlya transversal'no-izotropnoy plastiny [On the construction of twelfth-order bending equations for a transversely isotropic plate]. *Applied mechanics*, vol. 29, no. 12, pp. 51–58.

25. Reddy J.N. (2004). *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, 2nd Edition, CRC Press, Washington D.C, US.

26. Reissner E. (1944). On the theory of bending of elastic plates. *J. of Math and Phys.*, vol. 33, pp. 184–191.

27. Reissner E. (1950). On a variational theorem in elasticity. *J. Math and Phys.*, vol. 33, pp. 90–95.

28. Reissner E. (1952). Stress strain relations in the theory of thin elastic shells. *J. Math. and Phys.*, vol. 31, no. 1, pp. 32–42.

29. Timoshenko S.P. (1921). On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars. *Philosophical Magazine and Journal of science*, vol. 41, no. 6, 245, pp. 744–746.

30. Vekua I.N. (1955). Ob odnom metode rascheta prizmaticheskikh obolochek [On a method for calculating prismatic shells]. *Proceedings of the Tbilisi Mathematical Institute*, vol. 21, pp. 191–293.

31. Zelenskiy A.Gh. (2009). Modeli analitychnoy teorii transversal'no-izotropnykh plyt [Models of analytical theory of transversal-isotropic plates]. *Bulletin of Dnipropetrovsk University*, vol. 17, no. 5, pp. 54–62.

32. Zelenskiy A.Gh. (2007). Metod vzajemov'jazanykh rivnjanj vyshhogho porjadku v analitychniy teorii pologhykh obolonok [The method of interconnected higher-order equations in analytical theory of hollow shells]. *Methods for solving the applied problems of deformable solid mechanics. Proceedings of Dnipropetrovsk National University*, vol. 8, pp. 67–83.

33. Zelenskiy A.Gh. (2008). Metod rozv'jazuvannya systemy dyferencialnykh rivnjanj vysokogho porjadku v analitychniy teorii netonkykh obolonok [A method of solving a high-order differential equation system in analytic theory of non-thin shells]. *Methods for solving the applied problems of deformable solid mechanics. Proceedings of Dnipropetrovsk National University*, vol. 9, pp. 92–103.

34. Zelensky A.G. (2016). Method of Solution Equation System Within the Variant of Mathematical Theory of non-thin Shallow Shells. *International Scientific Journal*, Kiev, no. 7, pp. 137–141.

35. Zelensky A.G. (2019). Mathematical Theory of Transversally Isotropic Shells of Arbitrary Thickness at Static Load. *Materials Science Forum, Actual problems of engineering mechanics*, Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, vol. 968, pp. 496–510.

## NONLINEAR ARCHITECTURE AND MATHEMATICAL MODELING IN THE SYSTEM OF INTEGRATIVE LEARNING

Lyubov Shchelkunova<sup>1</sup>

Mariia Yemets<sup>2</sup>

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-15-0-64>

**Abstract.** The article raised the issue of interdisciplinarity of the knowledge space of nonlinear architecture, among which mathematical methods and models are highlighted. The subject of research is the area of interaction between mathematics and nonlinear architecture in modern practice of architectural design in order to find approaches incorporating advanced mathematical knowledge in the educational process. Such work is the basis for integrative educational activities aimed at the implementation of intersubject communications. Statement of the problem. At present, such powerful areas of interdisciplinary knowledge, which are widely used in modern practice of architectural design, are not reflected in the programs of mathematical preparation of student architects. The research is aimed at eliminating the contradictions associated with the mismatch of the content of the mathematical education of students of architectural specialties with the requirements of modern architectural design. Materials and methods. The following methods were used in the work: collection, systematization, classification and generalization of information regarding the problem posed, a comparative analysis of different pedagogical approaches, synthesis and analysis of the results of one's own pedagogical integrative activity. Findings. The article substantiates that nonlinear architecture is interdisciplinary in nature and in this space one of the leading roles is played by mathematical methods and models. The field of basic mathematical methods and models used in modern nonlinear architecture is determined, among which the methods of fractal, geometric and parametric modeling are highlighted. The basic principles of fractal, geometric and parametric modeling of architectural objects are revealed and it is indicated that in many cases their fields of application intersect. This

---

<sup>1</sup> Associate Professor,

Kharkov National University of Construction and Architecture, Ukraine

<sup>2</sup> Candidate of Economic Sciences, Senior Lecturer,

Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine

nature of architectural activity justifies the need to create conditions for students to acquire interdisciplinary knowledge that meets the requirements of modern design. Authors propose to solve this problem on the basis of integrated technologies by developing and implementing special courses of applied orientation. The experience of such work indicates the necessity of combining the efforts of mathematicians, architects and IT specialists. As an alternative way to solve the problem, it is proposed to work within the framework of the student scientific society, and it is indicated that the experience of such activities demonstrates a positive result. The introduction of integrative forms of training provides the conditions for the acquisition of interdisciplinary knowledge, which is one of the key competencies of a modern specialist. This approach to the organization of the educational process contributes to its optimization.

### **1. Introduction**

Formulation of the problem. For many centuries, architectural forms were defined (designed) in the language of geometry. Mathematical models describing geometric shapes laid the foundation for the formation of architectural forms. With the advent and development of computer science, the methods of shaping architectural objects also transformed. Modern computer methods for designing forms are based on the language of mathematical formulas and geometric constructions.

The term "nonlinear architecture" appeared at the end of the last century. The development of this direction is associated with the development of new dynamic principles of shaping, which are based on the mathematical paradigm of nonlinearity. The emergence of such a direction was facilitated by the development of both computer technologies and sciences of complex systems (sciences of complexity) such as fractal geometry, nonlinear dynamics, complexity theory (founder I. Prigogine), chaos (founder E. Lawrence), catastrophes, etc.

However, the presence in modern practice of architectural design of such powerful interdisciplinary areas of knowledge is practically not reflected in the educational process of students. The inclusion of this new relevant knowledge in educational programs based on integrative learning technologies could help to open up new opportunities for improving the quality of education for student architects. The relevance of such work is due to the direction to optimize the educational process by eliminating the contradictions associated with the mismatch of the content of mathematical educa-

tion of students of architectural specialties with the requirements of modern architectural design [8, p. 212].

Analysis of relevant research. The development of "non-linear architecture", the formation of which dates back to the end of the twentieth century, was accompanied by modeling of various curved structures. Compared with classical architectural forms, in many cases these constructions were revealed to be more effective. It is, for example, to minimize consumables or increase the stability of the structure. Moreover, the modeling process is based on mathematical algorithms that underlie geometric, parametric, algorithmic and other design methods.

Today there are many publications related to the definition of the range of problems of architecture and urban planning, the solution of which is based on the use of mathematical methods and models. In these research, the term "architectural mathematics" appeared. However, the content and structure of this concept remain uncertain, since information on mathematical methods and models in architectural and urban planning is still fragmented [8, p. 214].

The inclusion of mathematical knowledge in the structure of architectural education is a complex, multifaceted and often contradictory system. In some universities, the teaching of higher mathematics is limited to a small basic course, the volume of which has been constantly decreasing in recent years. According to the authors, at present, in many universities, the volume of educational material included in the academic programs training discipline "Higher Mathematics" is completely insufficient, since it does not take into account new field of mathematics, the methods of which are used in modern practice of architectural design and urban planning.

The process of integration in education and science as a scientific concept appeared at the end of the last century, and is a leading trend in recent years. The goal of integration in education is to build such interconnections of the elements of the educational process that would create its completeness and integrity.

The relevance of the emergence of integrative pedagogical activity related to the concept of integration is based on the need to form personalities with polyphonic thinking as a condition for a deep understanding of the relationships in the processes of the world.

The tools for the implementation of integrative and pedagogical activities are integrative and pedagogical technologies, which are based on relevant concepts.

There are different approaches to the classification of integrative activities in the education system. Among its main types (forms), it is possible to single out searches in the field of intrasubject and intersubject integration in order to optimize the educational process. The basis of such integrative and pedagogical activity is based on the concepts of intrasubject (V.I. Zagvyazinsky) and intersubject integration of pedagogical knowledge (founder John Dewey), integration of general and professional education (M.N. Berulova, Yu.S. Tyunnikov) etc.

A feature of intersubject integration is that it contributes to the organization of the educational process in which different academic disciplines interact, and intra-subject integration is also included in this activity.

The authors studied the experience of teaching higher mathematics in related universities. In some of them, teaching mathematical methods to student architects relies on the preservation of educational traditions with the updating of some blocks.

The experience of teaching higher mathematics at the Ural State Academy of Architecture and Art is interesting. Here, specialists from different fields interacted, which made it possible to solve problems in the analysis of architectural situations using mathematical methods. The main scientific and methodological direction is the development of new methods of teaching mathematics and computer disciplines in relation to the education of architects and designers [8, p. 212].

The aim of this research work is to study the field of interaction between mathematics and nonlinear architecture as a component of an integrative learning system (in the context of the application of mathematical methods and models in architectural and urban planning practice). Such work is the basis for integrative educational activities aimed at the implementation of intersubject communications. The authors define the following main objectives of the study:

1. Studying the experience of teaching higher mathematics to students of architectural specialties in related universities.
2. The study of basic mathematical methods and models used in modern nonlinear architecture.
3. Identification of the basic principles of fractal, parametric and geometric modeling (based on the sciences of complex systems) when creating architectural objects.
4. Determination of approaches to introducing into the educational space of students of architectural specialties the interdisciplinary principle of teaching (in the context of teaching mathematical disciplines).



The following methods were used in the article: collection, systematization, classification and generalization of information regarding the problem posed, a comparative analysis of different pedagogical approaches, synthesis and analysis of the results of one's own pedagogical integrative activity; generalized the results of domestic and foreign experience.

### **2. Mathematical methods in nonlinear architecture**

Over the years, the authors have been searching for approaches to incorporating new mathematical knowledge into the training system for architects. The solution to this problem is carried out by developing elective courses designed for masters and senior students. Such special courses contain integration units of mathematical, computer and architectural knowledge.

A feature of this approach is the emphasis on the applied orientation of the content of educational material. In addition to the mathematical foundations of the corresponding theory, the thematic plan of the special course necessarily contains the main directions of the practical application of mathematical methods in architectural and urban planning practice.

The use of computer technology in shaping has led to the concept of digital architecture creating computational architectural objects. An analysis of the literature indicates the existence of different approaches to the description and systematization of computer modeling methods in nonlinear architecture. So, they distinguish such widely used methods in modern architectural practice as computer parametric, fractal, algorithmic, geometric modeling and their combinations. The applications of these methods often overlap due to the coincidence of the principles on which they are based.

All of the above demonstrates the interdisciplinary nature of modern architectural activity. Such a direction requires reflection in the educational process by creating conditions for the integrative activities of specialists in different fields.

### **3. The method of geometric modeling in nonlinear architecture**

The method of geometric modeling in architectural and urban planning practice allows you to build a geometric object for the given properties and characteristics using computer programs. In modern design practice, many software packages are used (ArchiCAD, AutoCAD, Compass, Lira, MicroFe, ANSYS and others), however, the algorithms embedded in them sometimes require refinement for individual parameters. At the same time, the use of such universal mathematical software products as Mathematica,

Maple, Matlab, MathCAD, can lead to the construction of many different surfaces by changing the parameters of their analytical expression.

In nonlinear architecture, an important place is occupied by the algorithms of formation and transformation of the architectural form. The authors consider it necessary to search for opportunities for students to familiarize themselves with the mathematical foundations of geometric modeling. We are talking about analytical methods and algorithms for constructing mathematical models of surfaces and their scans (frames, shells, arches, etc.). However, in accordance with the existing programs of mathematical education of student architects, the only basis for such a study is school Euclidean and analytical geometry.

According to the authors, it is useful, interesting and important for students of architectural faculties to offer special courses on analytical surfaces that have found application in modern architectural and construction practice. The study of the variety and properties of such surfaces, in our opinion, can help future designers in the search for new forms in architecture. According to the famous architect and engineer E. Torroch, it is the form that ensures the reliability of the structure is the criterion of its quality.

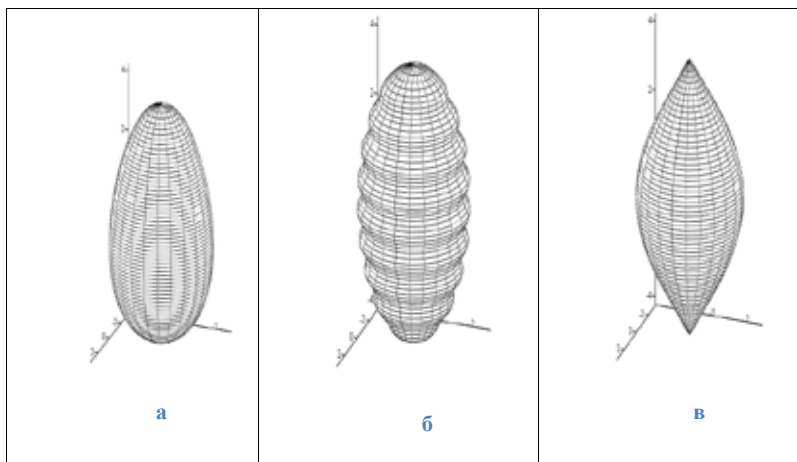
There is reference and encyclopedic literature on the use of analytical surfaces in architectural and urban planning. However, a systematic review of the entire variety of surfaces used in various fields of activity (in particular, in architectural design) is implemented only in the book "Encyclopedia of Analytical Surfaces" (authors: Krivoshapko S., Ivanov V.).

This book is an encyclopedic publication on analytical and differential geometry of regular analytical surfaces, which have found application in various branches of mathematics and in various branches of engineering and construction [4, p. 3; p. 560]. The authors of the publication single out a large number of classes and subclasses of surfaces, among which in the basic course of the Higher Mathematics discipline for architectural specialties only second-order surfaces, cylindrical and rotation surfaces are considered. Important topics related to modeling surfaces of revolution are not included at all in the program, using as generators and guides not only simple geometric images (straight line, circular arc, ellipse, parabola, hyperbola), but also other arbitrary curves. And this approach provides unlimited possibilities in the shaping (for example, domes and arches), which contributes to the achievement of architectural expressiveness of structures [3, p. 80].

Outside the students' attention, there remain such surfaces common in architectural practice as chain, spiral, and higher-order surfaces. Also, elements of dif-

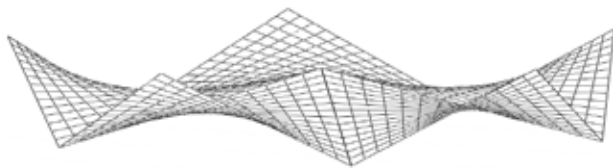
ferential geometry are not included in the program of mathematical education, which means that the local properties of geometric objects remain unexplored.

The transformation of surfaces defined analytically can be carried out using both linear and non-linear transformations. Figure 1 provides the images of an ellipsoid obtained as a result of transformations given by different matrices [1, p. 106].



**Figure 1. Transformations of an ellipsoid as a result of smooth nonlinear transformations [1, p. 108]**

Interesting and useful are the issues of modeling composite structures, each element of which can be represented by different analytical expressions (Figure 2). Due to the capabilities of geometric modeling, these parts are combined using a group of affine transformations of motion, which include rotation and parallel translation transformations.



**Figure 2. Composite surface of elements in the form of hypars [1, p. 112]**

#### **4. The method of fractal modeling in nonlinear architecture**

Among the relevant mathematical knowledge in architectural practice, we can distinguish fractal geometry methods, which today are becoming increasingly important in applied research. The main properties of fractal structures in architecture and urban planning include the following: self-similarity, ability to develop and move continuously, fractional dimension, manifestation of chaos and order at the same time.

It should be noted that fractal geometry is not included not only in the curriculum of the disciplines of the mathematical cycle, but also in the educational standards of training. And this means that future designers in the learning process at the university do not have the opportunity to acquire the basic foundations for using the fractal modeling method in future design activities.

To bridge this gap between mathematics-discipline and mathematics-science, the authors developed an integrated special course for undergraduates and master's degrees "Fractal Geometry and Architectural Design" [9, p. 66]. The structure and content of the author's program of the special course reflect the search for opportunities for students to acquire fractal construction skills using software tools. The authors expect that as a result of such work, future specialists will gain experience in modern types of activities and expand their capabilities in the field of creating various mathematical models in architectural design.

The program of the special course integrates knowledge blocks from fractal geometry, computer, in particular, fractal graphics, and the practice of architectural design. The problem of choosing integrative educational forms is associated with the construction of a model for establishing, primarily intersubject communications. Promising are the so-called previous connections, in which the lesson includes material previously studied in another discipline. In this case, concomitant relationships are established in which material from different disciplines is studied at the same time.

Table 1 presents the author's program of the integrated special course "Fractal Geometry and Architectural Design". The main objective of the course is the acquisition by students of skills in building fractals using software tools, which expands the possibilities of creating various mathematical models in architectural design and enriches them with the experience of modern activities.

A feature of the development of an integrated special course is the creation of software and methodological support: integrated universal envi-

ronments, manuals, presentations. For example, to expand on the topic "Algorithms for constructing fractals", presentations were prepared on the topics "Building fractals using *L*-systems", "Building fractals on the complex plane", "Building fractals using affine transformations". When using *L*-systems, the "turtle-graphics" are used as output subsystems.

One of the main characteristics of fractal geometry is fractal dimension, which serves as a measure of the structure and self-similarity of an object. A fractal set fills space not as in the case of an ordinary geometric set, therefore, a fractal dimension is considered as a characteristic of the complexity of an object. In architecture, the consistency of the levels of fractal dimension of various elements of the object indicates the level of aesthetic expressiveness of the architectural structure: with an increase in consistency, the aesthetic value of the object increases.

To expand on the topic "Modeling fractal dimension", a presentation was prepared where different approaches to determining this characteristic are systematized, the main methods for its modeling are described, and examples of the use of fractal dimension analysis in architectural practice are presented [9, p. 67].

It is indicated that there are different approaches to determining the dimension. For mathematical fractals, these definitions are equivalent and differ only in the calculation algorithm. For the analysis of natural objects in architectural practice, they often use the point or cell method, the Hurst method (normalized scale method), the method of mass and informational dimension, the Grassberger-Proccaccio method and other numerical methods, since the use of a strict definition of fractal dimension is either impossible or may lead to inaccurate (and sometimes erroneous) results.

As described above, special attention in such integrative activities is paid to applied issues. The authors studied scientific papers related to the analysis of the use of fractal structures in architectural design. So, it's doctor of architecture S.B. Pomorov' opinion, that there are two ways to apply fractal structures in architectural design practice. The first way is associated with the use of well-known fractal models developed by famous scientists. Such structures include Sierpinski's napkin, Meger's sponge, Kanter's set, Koch curve, etc. For example, fractal structures in the form of a napkin and Sierpinski's triangle can be found in real design practice: works by Norman Foster (Hearst Tower), Kenzo Tange (Building Fuji TV headquarters on Odaiba Island) and others (Table 2).

Table 1

**The program of the integrated special course  
"Fractal analysis in architectural design"**

<b>№ lessons</b>	<b>Lesson topic</b>	<b>Using ICT Technology</b>
1-2	Fractals and their properties	Presentation "Classification of fractals"
3-4	Fractal Construction Algorithms	Presentations: "The construction of fractals using L-systems", "The construction of fractals using affine transformations", "The construction of fractals on the complex plane"
5-6	Fractal modeling using software	Maple, MathCAD, Math LAB
7-8	Fractal dimension modeling	Presentation: "Fractal dimension calculation methods"
9-10	Fractal Graphics Elements	Editors: -Painter, Art Dabbler - Fractal Explorer, Chaos Pro. Visual Studio 2013
11-12	The use of fractal structures in architectural practice	Presentations: "Protofractals", "Multifractals"
13-14	Examples of computer fractal models in architecture practice	

The modern architecture of buildings and structures, based on the use of quasifractals and multifractals (determined by several algorithms), demonstrates many different forms: from natural (drop-shaped, undulating) to completely bizarre.



The second way is to use the algorithm of natural systems in the created architectural project. This approach requires computer software for two purposes: firstly, to detect this algorithm in natural objects using computer analysis, and secondly, to use the algorithm in design [5, p. 80].

The emergence of mathematical models of cities with a dynamic structure as a complex self-organized system (a departure from static models) was the result of using the fractal principle of construction in urban planning. Since the "self-similarity" property in mathematical models is realized through recursive formulas, an unlimited number of similar fractal

structures can be reproduced at any scale in each fractal. Such an approach to design assumes the existence of an interdisciplinary coordination of elements of the urban planning system.

Table 2

**Architectural examples of fractal structures  
(Patrik Schumacher, 2008)**

№	Fractal structures	Application examples
	 <p>Sierpinski Triangle</p>	 <p>Hearst Tower – a building designed by Norman Foster</p>

The principles of fractal geometry have created new promising opportunities not only in modeling the urban environment, but also in the study of architectural compositions of buildings, which is especially valuable in relation to cultural heritage.

One of the main characteristics of fractal geometry is fractal dimension, which serves as a measure of the structure and self-similarity of an object. Fractal dimension is one way of determining the dimension of a set in metric space. One of the features of fractal dimension is its fractional value. For sets describing ordinary geometric shapes, the theoretical fractal dimension is equal to the usual Euclidean or topological dimension.

The scope of the fractal dimension analysis in modern architectural practice and urban planning includes the study of architectural monuments, which helps to reveal the specifics of their formation, identify new characteristics, adapt the experience of architecture of the past in modern architectural and urban planning (which contributes to the effective implementation of restoration work) [6, p. 14].

For example, at the Institute of Architecture and Design FSBEI HPE Altai State Technical University named after I.I. Polzunova, a fractal anal-

ysis of 17 Islamic monuments located in different countries and created at different times was carried out [7, p. 144]. For the first time, a fractal compositional analysis of medieval cultural monuments was carried out: the Taj Mahal in India, the Sultan Ahmad mosque in Turkey, the Aljumma mosque in Iran, Tilla Kari Madrasah in Uzbekistan and others.

As a result of the research, a direct dependence of a high degree of fractality of Islamic architecture monuments and their artistic qualities was substantiated. Fractality was one of the most important means of revealing the compositional consistency of parts of buildings, as well as the unity of the structures of the architectural monument and the surrounding space.

In the analysis of the main projections of the Taj Mahal, the fractal dimension of the city plan, landscape plan, facade, section and ornament is high and is described by the following mathematical ratio  $1 < D < 2$ . As a result of the comprehensive fractal analysis of the Taj Mahal, a high degree of fractal coordination was revealed at the urban and architectural levels. According to the authors, this gives one of the possible explanations for the integrity, unity, high artistic expressiveness of the Taj Mahal ensemble [7, p. 148].

Using fractal geometry methods, it is also possible to evaluate and predict planning structures at the city and agglomeration levels. Such an approach allows us to take into account the diversity and complexity of factors affecting the geometry of spatial phenomena, in contrast to urban planning models based on the laws of Euclidean geometry.

Active use of the fundamentals of fractal geometry in urban planning began in the late twentieth century and is continuing today. Fundamental work is now considered the work of P. Franckhauser (1998) and Betty and Longley (1994), where new principles for assessing the geometry, shape and structure of urban development objects were introduced.

Fractal analysis helps in the design of transport networks, a system for locating population densities, citywide subcenters, places of employment, etc. (Gushchina, 2016). This approach is designed to maximize the synergistic effect of the interaction of parts of the urban agglomeration.

## **5. Parametric modeling method in architecture**

The parametric modeling method has long been widely used in architectural practice. This is due to the much greater opportunities that arise in the process of such an approach to design, in comparison with tradi-



tional methods. Parametric modeling involves designing on the basis of a form self-organizing algorithm that takes into account the parameters of the model elements and their relationships. By varying the parameters, one can quickly get many different design solutions.

The basis of modern parametric modeling are BIM technologies. BIM (Building Information Modeling) is an information modeling of a building, the peculiarity of which is that the object is designed as a whole. Moreover, the simulated complex surfaces are based on mathematical models that include parametric equations.

Among the main techniques of the parametric method, meshing is distinguished. This grid is created through the points leaving it with the possibility of further transformation in various ways (extension, indentation, bending) and at the same time, any performed action is parameterized. For such techniques, there is MESH technology embedded in many software packages in which any form is generated through the category of nets. Such software environments include Corel Draw, Grasshopper, CATIA, 3D Max. In them, any shape can be transformed in tools such as Editable Mesh (Editable Surface), Creation Mesh (Create Surface) and change the shape by changing the coordinates and properties of each point on the surface. Complex forms can also be generated in the parametric method based on the use of heterogeneous rational B-splines (NURBS) and on the basis of portions of Bézier surfaces (Editable Patch) [2, p. 18].

It should be noted that in nonlinear architecture the concept of parametric design is becoming more widespread and may intersect with fractal design.

### 6. Findings

1. The necessity of bridging the gap between mathematics-discipline and mathematics-science in the context of the existing discrepancy between the content of the mathematical education of students of the architectural and urban specialty with the requirements of modern design is substantiated.

2. The interdisciplinary nature of nonlinear architecture is pointed out, the principles and rules of which are based on mathematical methods and models, which are becoming increasingly important in the design process. All this justifies the need to create conditions for students to obtain multidisciplinary knowledge through the introduction of integrated technologies.

3. The field of basic mathematical methods and models used in modern nonlinear architecture is determined, the basic principles of fractal, geometric and parametric modeling of architectural objects are identified.

4. The limited nature of the presence of modern mathematical knowledge in existing educational programs is indicated and the possibilities of introducing this knowledge into the educational process are investigated.

5. The approaches aimed at the acquisition of interdisciplinary knowledge by future designers through the organization of scientific work in the framework of student scientific societies, as well as the introduction of specialized courses of applied orientation based on integrative technologies, are proposed.

## **7. Conclusions**

Taking into account modern trends related to the strengthening of the interdisciplinary nature of the educational process, the joint efforts of mathematicians, architects, and IT specialists are necessary for the organic for implementation of mathematical knowledge into educational design.

The approach proposed in this paper to reduce the gap between mathematics and science and mathematical discipline in the process of training student architects requires the joint efforts of specialists in several fields, as well as coordination at different levels.

The process of creating and implementing any new educational course requires long and painstaking efforts. In addition to developing a thematic plan and methodological support for the discipline, the problem of finding opportunities to include a new course in the educational process arises.

The authors, as one of the possible directions for introducing new knowledge into the educational process of students of architectural specialties, offer work in the framework of the student scientific society. And the experience of such activities demonstrates a positive result. Students, having first become acquainted with the principles of fractal geometry, say that this new knowledge changes their whole understanding of the world. Also, according to the authors, it is advisable to carry out such work at the undergraduate level.

The authors believe that the need has long been ripe for revising the content of educational programs for students majoring in Architecture and Urban Planning.

It should be noted that any new course should form an integral pedagogical system. The concept of creating special courses proposed in the article involves a review of approaches to the selection, placement of educational material, as well as the choice of teaching style, which is primarily associated with the applied orientation of such courses.

### References:

1. Beljaeva Z.V. (2015). Geometricheskoe modelirovanie prostranstvennykh konstrukcij [Geometric modeling of spatial structures] (PhD Thesis). Yekaterinburg: UrFU named after the first president of Russia B.N. Yeltsin. (in Russian)
2. Volynskov Je.V. (2012). Informacionno-tehnologicheskie metody proektirovanija v arhitekturnom formoobrazovanii [Information and technological design methods in architectural shaping]. (PhD Thesis). Moscow: Moscow Architectural Institute. (in Russian)
3. Gushhina E.S., Smogunov V.V. (2016). Fraktal'naja razmernost' v ocenke planirovochnoj struktury krupnogo goroda [Fractal dimension in assessing the planning structure of a large city]. *Sovremennye nauchnye issledovanija i innovacii – Modern research and innovation*, no. 2, pp. 110–116. Retrieved from: <http://web.snauka.ru/issues/2016/02/63202> (in Russian)
4. Krivoshepko S.N., Ivanov V.N. (2010). Jenciklopedija analiticheskikh poverhnostej [Encyclopedia of analytical surfaces]. Moskva: Knizhnyj dom "LIBROKOM". (in Russian)
5. Pomorov S.B., Ismail Haled D.A. (2014). Terminologija nelinejnoj arhitektury i aspekty ejo primenenija [Terminology of nonlinear architecture and aspects of its application]. *Vestnik TGASU – Bulletin TGASU*, no. 3, pp. 78–87. (in Russian)
6. Patrik Schumacher (2008). Parametricism – A New Global Style for Architecture and Urban Design. *AD Architectural Design – Digital Cities*, vol. 79. No. 4, pp. 14–23
7. Ismail Haled D.A. (2013). Fraktal'nye postroenija v kompozicii arhitekturnykh ob"ektov (na primere pamjatnikov islamskoj arhitektury [Fractal structures in the composition of architectural objects (on the example of monuments of Islamic architecture)] (PhD Thesis). Barnaul: Altai State Technical University named after I.I. Polzunova. (in Russian)
8. Shchelkunova L.I., Shulhina S.S. (2011). Pro pidhodi do vdoskonalennja zmistu navchal'noi disciplini «Vishha matematika» dlja studentiv arhitekturnih special'nostej [About approaches to improving the content of the subject "Higher Mathematics" for students of architectural specialties]. *Teorija ta metodika navchannja matematiki, fiziki, informatiki – Theory and methodology of teaching mathematics, physics, computer science*, vol. 9, pp. 212–215. (in Ukrainian)
9. Shchelkunova L.I. (2017). Differencial'naja geometrija i fraktal'nyj analiz v arhitekturnom proektirovanii [Differential geometry and fractal analysis in architectural design]. *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference: Science in the 21st Century: Challenges and Prospects for Development* (April 28). Voronezh: Research, pp. 63–69. (in Russian)

Izdevniecība "Baltija Publishing"  
Valdeķu iela 62 - 156, Rīga, LV-1058

---

Iespiests tipogrāfijā SIA "Izdevniecība "Baltija Publishing"  
Parakstīts iespiešanai: 2019. gada 29. Novembrī  
Tirāža 300 eks.