

**MININGMETALTECH 2023 –  
THE MINING AND METALS SECTOR:  
INTEGRATION OF BUSINESS, TECHNOLOGY  
AND EDUCATION**

**Scientific monograph**



IZDEVNIECĪBA  
**BALTIJA**  
PUBLISHING  
**2023**

*Recommended for printing and distribution via Internet  
by the Academic Council of Baltic Research Institute  
of Transformation Economic Area Problems according  
to the Minutes № 11 dated 29.11.2023*

## **REVIEWERS:**

**Volodymyr KUKHAR** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Metallurgy, Materials Science and Industrial Management, Vice Rector for Research, LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

**Oleksandr KURPE** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Cold Rolling Group, METINVEST ENGINEERING LLC.

**Natalia REKOVA** – Doctor of Economic Sciences, Professor, Professor at the Department of Digital Technologies and Project-Analytical Solutions, First Vice Rector– Vice Rector for Academic Affairs, LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

**Dmytro PIKARENIA** – Doctor of Geological Sciences, Professor, Professor at the Department of Labor Safety and Environmental Protection, LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

**Ivan SAKHNO** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Exploitation of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University

**Olha CHEREDNYCHENKO** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Digital Technologies and Project-Analytical Solutions

**MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education** : Scientific monograph. Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. 276 p.

## **CONTENTS**

### **PROSPECTS OF METALLURGY AND MATERIALS SCIENCE**

THE ORGANIZATION OF IRON ORE AGGLOMERATE AND PELLETS PRODUCTION WITH REDUCED ENVIRONMENTAL IMPACT (Boiko M. M., Petrenko V. O.) .....	1
1. Analysis of the potential use of fuel biomass in the production of iron ore agglomerate .....	2
2. Iron ore pellets production with partial replacement of natural gas with biomaterials .....	8

STUDY OF THE PROCESS OF BREAKING ROLLED STEEL BY BENDING FOR STAMPING UNDER IMPACT AND COMBINED LOADING (Karnaukh S. G., Markov O. Ye.) .....	20
1. Analysis of literature data and goal setting .....	20
2. Mathematical modeling of the dynamic and static-dynamic breaking of rolled stock according to the three-point bending scheme .....	23
3. Experimental studies of the separating long products according to the three- point bending scheme under dynamic and static-dynamic loading .....	29

IMPLEMENTATION OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FOR PRODUCTION OF TMCP TREATED 10MN2VNBAL STEEL HEAVY PLATES (Kukhar V. V., Kurpe O. H., Malii K. V.) .....	41
1. Literature Review .....	41
2. Methodology of Research .....	45
3. Result of Research .....	50

SIMULATION SYSTEM FOR THE THERMAL OPERATION PROCESSES OF IRON LADLE LININGS (Levytska T. O., Dubovkina M. Yu.) .....	63
1. Identifying Problem Preconditions and Problem Formulation .....	64
2. Mathematical Model .....	67
3. Design Model .....	76
4. Software Development .....	78

ENERGY AND TECHNOLOGICAL MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES FROM OUT-OF-FURNACE IRON PROCESSING TO CONTINUOUS CASTING (Stoianov O. M., Petrenko V. O., Niziaiev K. G.) .....	84
---	----

## **PRIORITIES FOR IMPROVING THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF MINING COMPANIES**

DETERMINATION OF DRILL ROD VIBRATION OSCILLATIONS IN AUTOMATED ELEC-TRIC DRIVE SYSTEMS (Khilov V. S.).....	96
1. Natural frequencies of drill rig oscillations at the beginning of drilling with one rod .....	97
2. Longitudinal and torsional frequencies of the drill rod vibrations.....	98
3. Transverse frequencies of the drill rod vibrations.....	100
4. Natural frequencies of drill rod oscillations during rod buildup.....	101

## **INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS, ROBOTIC AND MECHATRONIC SYSTEMS**

ANALYTICAL STUDY OF METHODS OF IDENTIFICATION OF CONTROL OBJECT (Koyfman O. O., Miroshnychenko V. I., Simkin O. I.).....	113
1. Analysis of methods for identifying control objects.....	114
2. Algorithm and results of the research on the example of a single process step response .....	121
3. Analysis of results of the research of a sample of process step response .....	130

## **MODERN ECO-FRIENDLY PRACTICES AND PROSPECTS FOR ENVIRONMENTAL PROTECTION**

RECYCLING OF ORE PROCESSING WASTE USING GLASS TECHNOLOGY (Zhdaniuk N. V., Plemiannikov M. M.).....	149
1. Molding properties of glass melt and its viscosity characteristics .....	150
2. Crystallization ability of glass system $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$ ....	155
3. Mineralogical composition of glass-crystalline materials obtained from iron ore enrichment waste .....	158
4. Assessment of technological and decorative properties synthesized glasses and glass-crystalline materials.....	159


INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR JOINT PURIFICATION OF HIGHLY MINERALIZED MINE WATER AND BOILER-ROOM EMISSIONS (Kovrov O. S., Kulikova D. V.).....	166
1. Analysis of the relevant research and formulating the purpose of the study....	166
2. General information about the enterprise for design implementation .....	168
3. Qualitative and quantitative characteristics discharged mine water .....	170
4. Development of the technological scheme for joint purification of mine water and boiler room gaseous emissions .....	171
5. Environmental impact assessment .....	176
6. Qualitative composition of mine waters .....	177



<b>EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE ENCLOSING DAM OF THE DNIPROVSKE TAILINGS DUMP BY GEOPHYSICAL METHODS</b>	
(Pikarenia D. S., Orlinska O. V., Rudakov L. M.) .....	182
1. Characterization of the research object .....	182
2. Study of the technical condition of the tailing dams .....	187
3. Comprehensive interpretation of the selected zones .....	195
<b>MODERN TOOLS IN BUSINESS PERFORMANCE MANAGEMENT</b>	
<b>TEAM FORMATION FEATURES AT IMPLEMENTATION OF OPERATIONAL EFFICIENCY INCREASE PROGRAMS AND PROJECTS (Rovenska V. V., Smyrnova I. I., Latysheva O. V.) ....</b>	
1. The problem's prerequisites emergence and the problem's formulation .....	200
2. The analysis of existing methods for solving the problem and formulating a task for the optimal technique development .....	200
<b>THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE DEVELOPMENT OF THE IRON ORE INDUSTRY IN UKRAINE (Romanenko A. O.) ...</b>	
1. Methods .....	258
2. Theoretical part .....	260
3. Results .....	263

# 01

## CHAPTER



# Prospects of metallurgy and materials science

## **THE ORGANIZATION OF IRON ORE AGGLOMERATE AND PELLETS PRODUCTION WITH REDUCED ENVIRONMENTAL IMPACT**

**Boiko M. M., Petrenko V. O.**

### **INTRODUCTION**

In 2022, steel production amounted to 1.878 million tons, and according to the recorded demand<sup>1</sup>, it is expected to continue growing in the near future. At the same time, the rising cost of traditional energy resources and their negative impact on the environment are leading to an increase in the use of renewable energy sources worldwide. The use of biomass to generate energy using modern technologies is environmentally safer compared to the energy utilization of traditional organic resources like coal. An important aspect is that transitioning from fossil fuel-based energy sources to renewable sources will be more efficient by utilizing local resources and existing infrastructure.

One of the most promising types of renewable energy sources is biomass, which ranks fourth among fuels in significance. Biomass is the only form of energy in nature that contains carbon reserves in a sufficiently large quantity to effectively use it as a substitute for fossil fuels. Annually, biomass provides about 2 billion tons of equivalent fuel, accounting for approximately 14% of the total primary energy consumption in the world (up to 50–80% in some countries). In the EU's energy plans, there is a goal to increase the share of energy produced from renewable energy sources in gross final energy consumption to 20% by 2020, including 14% from biomass. By 2030, this figure is expected to reach 27%<sup>2</sup>.

According to the estimation of the Bioenergy Association of Ukraine, as of 2015, the total potential of energy from biomass was 20.2 million tons. The main components of this potential include agricultural by-products (straw from cereals and rapeseed, corn stalks, sunflower stalks, etc.) – 37.6%, and energy crops (willow, poplar, miscanthus) – 39 %<sup>3</sup>. However, according to the State Statistics Service of Ukraine, in 2015, the overall supply of primary energy from biomass was only 2.2%. Therefore, finding ways to increase the share of biomass utilization is a relevant task. A significant reserve for

---

<sup>1</sup> December 2022 crude steel production and 2022 global crude steel production totals. World Steel Association AISBL

<sup>2</sup> Heletukha H., Zheliezna T. Bioenerhetyka zamist hazu. Ekonomichna pravda

<sup>3</sup> Praktychnyi posibnyk z vykorystannia biomasy v yakosti palyva u munitsypalnomu sektori Ukrainy (dlia predstavnykiv ahropromyslovoho kompleksu). Ahentstvo z vidnovliuvalnoi enerhetyky. Kyiv, 2017. S. 16-17.

increasing the use of energy from biomass is concentrated in industries that are major consumers of energy resources. Metallurgy is one of such industries.

### **1. Analysis of the potential use of fuel biomass in the production of iron ore agglomerate**

Specialized scientific laboratories around the world have been actively studying the use of biomass instead of fossil fuels in various metallurgical processes over the past decade. The ways of utilizing biomass and its derivatives in metallurgy are detailed in the research<sup>4</sup>. It has been demonstrated that the utilization of biomass in metallurgical production is complex in terms of scientific, technological, and economic considerations and requires both theoretical and experimental research.

A significant amount of research has been conducted on the efficiency of using biomass in the agglomeration process of iron ore. The study<sup>5</sup> meticulously investigates the use of sunflower seed husks as additional fuel in the sintering of iron ore. It has been determined that during sintering, with the involvement of sunflower seed husks, replacing 10% of coke breeze does not result in significant changes in combustion characteristics during the sintering of iron ore or in the quality of the produced agglomerate.

The use of wood charcoal instead of some portion of coke or coal during the sintering of iron ore increases the combustion rate. The level of increase depends on the type of initial biomass and its proportion in the fuel composition. The effectiveness of adding wood charcoal decreases in the following order: straw > wood > peat. Additionally, adding biomass reduces the maximum temperature of the sintering material layer, the time required to reach the maximum sintering temperature, and widens the temperature range of sintering. It is also noted that changes in combustion conditions and gasification rates when using biomass do not contribute to the formation of liquid calcium ferrite. This leads to a decrease in the strength of the agglomerate due to a lower proportion of calcium ferrite in the mineralogical structure of the agglomerate<sup>6</sup>. Similar findings are reported by the authors of

---

<sup>4</sup> Suopajärvi H., Kemppainen A., Haapakangas J., Fabritius T. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 148. P. 714-716.

<sup>5</sup> Ooi T. Ch., Aries E., Ewan B.C.R., Thompson D., Anderson D.R., Fisher R., Fray T., Tognarelli D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Minerals Engineering*. 2008. V. 21. P. 177.

<sup>6</sup> Gan, M., Fan, Xh., Jiang, T. Fundamental study on iron ore sintering new process of flue gas recirculation together with using biochar as fuel. *Journal of Central South University*. 2014. 21. P. 4114.

another study<sup>7</sup>, who note that regardless of the type and quantity of biomass used in the sintering process, the output of agglomerate and its strength decrease. Possible mechanisms for adjusting the sintering process may involve changes in the particle size and quantity of biomass, the amount of air drawn in, and the properties of the biomass.

It is known that iron ore sintering is a source of a large number of harmful emissions – CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and organic compounds<sup>8</sup>. It has been found that the addition of sunflower seed husk reduces the formation of 2,3,7,8-polychlorinated dibenzoparadioxin and polychlorinated dibenzofuran by about 10 % – from 1 ng/nm<sup>3</sup> to 0.91 ng/nm<sup>3</sup><sup>9</sup>. When 20 % of coke was replaced with charcoal, dioxin emissions were reduced by about 33 %. Studies have shown that the use of charcoal derived from straw and sawdust in the amount of 40, 20 and 15 wt.%, reduces SO<sub>2</sub> emissions by 38 %, 32 % and 43 %, respectively, and NO<sub>x</sub> emissions by 27 %, 18 % and 31 %, respectively. Thus, the use of biomass can reduce the consumption of fossil fuels and reduce emissions. However, the negative effect of replacing coke with biomass is an increase in the CO content of sinter gas. The CO concentration in the gas increases from 2.07 to 2.85-3.11 vol. % for different types of biomass and from 3.0 to 5.0 vol. % when using different types of charcoal in the studies<sup>10</sup>. This problem can be solved by changing the amount of air that enters the fuel combustion zone.

Of particular note is that the use of biomass in metallurgy will reduce CO<sub>2</sub> emissions. This effect is particularly important in terms of the impact of metallurgical processes on climate change<sup>11</sup>.

The report of the European Commission's Research Fund for Coal and Steel on the use of alternative carbon materials in iron ore sintering deserves special attention<sup>12</sup>. Blast furnace dust and slag, petroleum coke, anthracite, sunflower husks and olive pits were used as alternative fuels. As for the studies with biomass, its grinding to a size smaller than the optimal size of coke fines

---

<sup>7</sup> Wei R., Zhang L., Cang D., Li J., Li X., Xu C.C. Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 68. P. 524.

<sup>8</sup> Mok Y.S., Nam I. Positive pulsed corona discharge process for simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from iron-ore sintering flue gas. *IEEE Trans Plasma Sci*. 1999. V. 27. P. 1188.

<sup>9</sup> Ooi T. Ch., Aries E., Ewan B.C.R., Thompson D., Anderson D.R., Fisher R., Fray T., Tognarelli D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process *Minerals Engineering*. 2008. V. 21. P. 177.

<sup>10</sup> Kawaguchi T., Hara M. Utilization of biomass for iron ore sintering. *ISIJ International*. 2013. V. 53. № 9. P. 1606.

<sup>11</sup> Norgate T., Haque N., Somerville M., Jahanshahi S. Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. № 8. P. 1481.

<sup>12</sup> European Commission. EUR 25151 – Alternate carbon sources for sintering of iron ore (Acasos). Research Fund for Coal and Steel. Final report. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*. 2013, 8 p.

contributed to the improvement of sintering temperature parameters, although the process performance and sinter quality were lower than when using non-coke fines. The main advantage of using biomass is the reduction of SO<sub>2</sub> emissions and improvement of the CO<sub>2</sub> balance.

Based on the literature analysis, it seems relevant to study practical approaches to the use of renewable raw materials as a fuel for iron ore sintering. In accordance with this, the goal was formulated and the main research objectives were defined.

The aim of the study is to experimentally investigate the impact of alternative fuels based on plant biomass on the iron ore sintering process and the quality of the resulting sinter. The main objectives of the study were:

- to investigate the impact of using different types of biofuels on the sintering process and sinter quality by conducting experimental studies using biomass alone as a fuel and in a mixture with coke fines;

- to analyse the differences in the sintering process using biomass compared to traditional fuels such as coke fines and anthracite.

The following materials were used for the study: iron ore, iron ore concentrate, coke fines, common limestone, lime, anthracite, walnut shells, sunflower seed husks and charcoal.

The chemical composition of the charge materials is shown in Table 1. Table 2 shows the technical analysis of the fuels used in the research.

Table 1

### Chemical composition of charge materials

Materials	Content, %								
	Fe <sub>tot.</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	LOI	Other oxides
Iron ore concentrate	65,88	28,27	62,71	6,44	0,30	0,17	0,26	1,85	-
Iron ore	57,75	1,76	80,54	12,71	1,60	1,72	0,62	1,82	0,47
Common limestone	0,28	-	0,40	1,5	0,56	48,5	0,92	43,56	-
Lime	12,66	-	18,09	1,8	26,61	86,8	1,40	-	-

Biomass is characterised by a high content of volatile substances, but low ash content and almost no sulphur. The highest content of non-volatile carbon is noteworthy for charcoal.

The composition of the sintering charge for each sample was calculated individually. The calculation was based on an agglomerate basicity of 1.40. The return flow rate was 25%. The content of iron ore concentrate in the charge was 68%, ore 15%, lime 2%, limestone 15%, and fuel consumption was calculated based on a 6% non-volatile carbon content.

Table 2

**Technical analysis of charge materials**

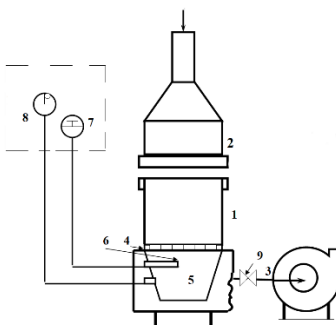
Materials	Humidity, $W^a$ , %	Ash content, $A^d$ , %	Volatile matter outcome, $V^d$ , %	Total sulphur, $S_t^d$ , %	Non- volatile carbon $C^{fix}$ , %
Coke fines	15,1	15,3	1,5	1,2	82,0
Anthracite	2,0	12,2	8,7	1,8	77,3
Charcoal	3,3	3,7	12,5	-	83,8
Walnut shells	7,2	0,3	75,6	0,2	23,9
Sunflower seed hulls	8,0	2,6	73,0	-	24,4

According to the charge calculation, the materials were weighed, mixed, moistened, mixed again and pelletized in a drum-type pelletiser. The water consumption for each sintering when using coke fines was 7%, while for other sinterings the water consumption varied depending on the moisture content of the raw materials.

The pelletized charge was loaded into a bowl with a grate on which a bed of sinter of 5–10 mm fraction was laid in advance.

A schematic diagram of the sintering unit is shown in Figure 1.

Sintering was carried out in the following sequence. The initial vacuum under the grate was set to 500 mm H<sub>2</sub>O. It should be noted that not in all cases sintering could be started exactly at the specified vacuum. This is due to significant fluctuations in the gas permeability of the charge column when using different types of fuel. Next, the charge fuel was ignited for 60 seconds to start the sintering process, with an ignition temperature of 1250°C.



**Fig. 1. Schematic diagram of the iron ore sintering plant:**

1 – sintering bowl; 2 – ignition horn; 3 – exhauster;  
4 – grate; 5 – vacuum chamber; 6 – thermocouple (type R); 7 –  
temperature indicator; 8 – vacuum gauge; 9 – valve for vacuum control  
in the vacuum chamber

Sintering was carried out in the following sequence. The initial vacuum under the grate was set to 500 mm H<sub>2</sub>O. It should be noted that not in all cases sintering could be started exactly at the specified vacuum. This is due to significant fluctuations in the gas permeability of the charge column when using different types of fuel. Then, for 60 seconds, the charge fuel was ignited to start the sintering process, the ignition temperature was 1250°C.

During the sintering process, the temperature of the exhaust gases and the discharge under the grate were monitored. These indicators were recorded every minute. Sintering was completed when the temperature of the exhaust gases reached a maximum and began to decrease.

After the sintering process was completed, the finished sinter was tested. The impact strength was determined as a percentage of the sinter fraction after a destructive load of more than 5 mm. The specific productivity of the sintering process was also calculated.

Based on the sintering results, the values of the main indicators of the sintering process, sinter quality and specific productivity of the sinter plant were calculated. The key technical and economic indicators of the sintering process using biomaterials are shown in Table 3.

Table 3

**Key indicators of the agglomeration process**

Biomaterial content	Type of fuel	Indicators			
		Sintering speed, mm/min	Output of usable agglomerate, %	Specific capacity, t/m <sup>2</sup> h	Impact strength, %
-	Coke	30,5	70,4	1,76	92
100% Biofuel	Charcoal	22,9	35,8	0,58	43,5
100% Biofuel	Walnut shells	30,5	24,2	0,406	25
100% Biofuel	Sunflower husks	27,5	14,4	0,12	*
75% Coke + 25% Biofuel	Charcoal	30,5	61,9	1,42	88,5
75% Coke + 25% Biofuel	Walnut shells	34,375	46,7	1,087	55,5
75% Coke + 25% Biofuel	Sunflower husks	91,6	36,1	0,13	*
50% Coke + 50% Biofuel	Charcoal	32,3	63,9	1,552	87
50% Coke + 50% Biofuel	Walnut shells	39,2	62,9	1,791	94,5
50% Coke + 50% Biofuel	Sunflower husks	68,75	27,2	0,825	*
25% Coke + 75% Biofuel	Charcoal	42,3	55,1	1,52	71,5
25% Coke + 75% Biofuel	Walnut shells	30,5	23	0,426	*
25% Coke + 75% Biofuel	Sunflower husks	61,1	9,9	0,173	*



The addition of biomaterials to the sinter charge improves the gas permeability of the sinter layer. Biomaterial particles are located between the charge granules and increase the open porosity of the layer.

Considering the effect of different types of solid fuels on the outcome of a suitable agglomerate, significant fluctuations are observed from 10 to 75 %. The lowest values are achieved when using Sunflower husks and charcoal. This can be explained by a decrease in the bulk density of biomaterials, which results in a sponge-like structure that produces a large amount of fines when crushed. The results of measuring the bulk density of biomaterials in comparison with anthracite and coke are shown in Table 4.

Table 4

**Bulk density of biomaterials and fuels**

<b>Type of biomass</b>	<b>Bulk density, kg/m<sup>3</sup></b>
Sunflower husk	180-210
Walnut shell	350-400
Charcoal	200-250
Coke fines	300-350
Anthracite	600-700

The minimum values of bulk weight correspond to sunflower husk and charcoal 180–210 kg/m<sup>3</sup> and 200-250 kg/m<sup>3</sup>. They also correspond to the minimum values of the outcome of usable agglomerate. In general, it should be noted that the addition of biomaterials in an amount exceeding 50 % significantly reduces the output of usable agglomerate.

The vertical sintering rate increases dramatically when using Sunflower husks. At the same time, the maximum temperature of the exhaust gases was 200–280 °C. This indicates a low temperature and thermal regime of the sintering process. This is due to the shorter burning time of biomaterial particles compared to coke and anthracite particles. The study <sup>13</sup> examined the change in the combustion time of anthracite and coke particles depending on their size. The authors point out that for the standard size of fuel particles during agglomeration, the combustion time of coke fines is 48–52 s, and that of anthracite is 72–76 s. However, for sunflower husk particles up to 3 mm in size, the combustion time is up to 40 s. This does not allow to ensure the required temperature level of agglomeration and the proper time for the charge to stay in the temperature zone sufficient for the sintering process.

As a result of the lower temperature level of the process, the amount of primary ore in the heat has increased, which leads to a decrease in the content of hematite formed during the secondary oxidation of magnetite.

---

<sup>13</sup> Zhang X., Zhong Q., Liu C., Rao M., Peng Z., Li G., Jiang T. Partial substitution of anthracite for coke breeze in iron ore sintering. Scientific Reports. 2021. 11:1540.

It should be noted that the low combustibility of anthracite resulted in incomplete fuel consumption during sintering; the amount of residual carbon in the heat was up to 10% of the initial content in the charge.

The specific productivity of the sinter plant depends on the outcome of suitable and vertical sintering rate. Thus, it can be seen that despite the increase in the vertical sintering speed, the addition of biomaterials reduces the vertical specific productivity by reducing the outcome of usable sinter. The maximum content of biomaterials can be called 25 % for charcoal and 50 % for walnut shells. When using sunflower husks, it was not possible to obtain an acceptable specific productivity of the sintering process with 25 % or more. Therefore, this biomaterial requires preliminary preparation to be used in the sintering of iron ore.

It can be seen that the use of more than 25 % charcoal and more than 50 % walnut shells in the fuel leads to a sharp deterioration in impact strength. This is due to an increase in the porosity of the sinter. It should be noted that in the course of the study, due to the very low yield, the amount of agglomerate used when using sunflower husks was insufficient for the strength test.

Thus, based on the results of an experimental study of the impact of alternative fuels based on plant biomass on the iron ore sintering process and the quality of the resulting sinter, it was found that charcoal can be used in an amount of up to 25 % while maintaining the sintering performance at an acceptable level, and walnut shells – up to 50 %. The use of sunflower seed husks is possible with preliminary preparation of the material, such as reducing the bulk weight, for example, by pressing.

To further improve the technological performance of agglomeration when using biomaterials as fuel, it is necessary to conduct research on the use of various pre-treatment methods. Another possible way to improve the agglomeration technology using biomaterials is to use separate pelletising methods.

## **2. Iron ore pellets production with partial replacement of natural gas with biomaterials**

Currently, over 99% of industrial iron ore pellets are produced by high-temperature processing in roasting facilities. The most widely used industrial processes for roasting pellets are the conveyor machine and the grate-tube furnace-cooler unit. The global pellet production accounts for about 60% of the world's pellets produced by conveyor machines and 40% by the grate-tube furnace-cooler. Both schemes are used to produce high-quality pellets for blast furnaces and pellets for direct reduction <sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> Kovalov D.A., Vaniukova N.D., Ivashchenko V.P. Yaholnyk M.V., Boiko M.M. Fizyko-khimichni protsesy vyrobnytstva okuskovanoi syrovyny. Ch. 1. Teoretychni osnovy ohrudkuvannia zalizorudnykh materialiv: Konspekt lektsii. Dnipropetrovsk NMetAU, 2007. 17 s.

Firing in a rotary kiln produces pellets with more uniform properties. The movement in the furnace causes the pellets to be mixed during heating, and their firing temperature becomes more uniform. The use of fuel in this case is more flexible compared to a conveyor machine. In addition to gaseous and liquid fuels, solid fuels such as coal and biomaterials can also be used. This is of particular interest in regions with cheap solid fuels.

Faced with climate change and societal impacts from emissions of harmful pollutants, the steel industry is increasingly shifting its focus towards more sustainable and environmentally conscious production methods<sup>15</sup>. In the search for ways to reduce CO<sub>2</sub> emissions, the use of biomass in metallurgy as a fuel and reducing agent in the pelletising of iron ore raw materials is considered promising<sup>16</sup>.

The possibility of partial substitution of fossil fuels during pellet firing with pyrolysed oil, wood pellets, and charcoal pellets was investigated. It was found that for conveyor roasting machines, the replacement of fossil fuels with biofuels is problematic due to changes in the temperature profile of pellets heating during roasting. For the grate-tube furnace-cooler system, it is possible to partially replace fossil fuels with the above biomaterials without significantly changing the process parameters<sup>17</sup>.

Various methods of biomass gasification as a substitute for natural gas in the production of pelletised feedstock were evaluated. All the gasification processes evaluated were determined to be economically feasible for full substitution of natural gas, with the exception of the biosynthetic natural gas production process<sup>18</sup>.

The paper considers the possibilities of producing partially metallised iron ore pellets containing carbon using agricultural waste. It is established that the use of biomass as a reducing agent for the partial reduction of iron oxides is an attractive method of metallisation and also contributes to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions<sup>19</sup>.

---

<sup>15</sup> Kieush L., Yaholnyk M., Boyko M., Koveria A., Ihnatenko V. Study of Biomass Utilization in the Iron Ore Sintering. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2019. Vol. 25. P. 55.

<sup>16</sup> Lina Kieush, Maksym Boyko, Andrii Koveria, Maksym Yaholnyk, Natalia Poliakova Manganese Sinter Production with Wood Biomass Application. *Key Engineering Materials*, 2020. Vol. 844. P. 124.

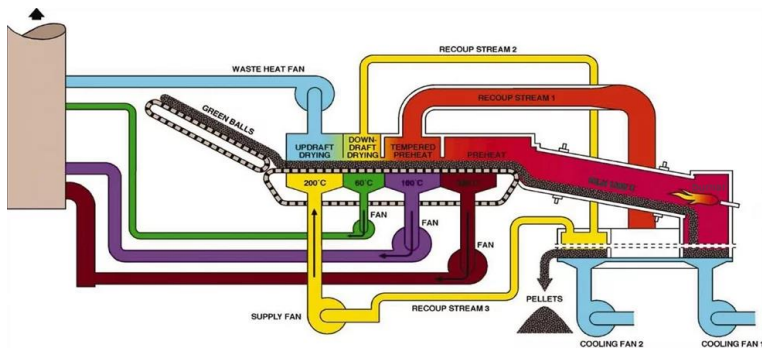
<sup>17</sup> Henrik Wiinikka, Alexey Sepman, Yngve Ögren, Bo Lindblom, and Lars-Olof Nordin. Combustion Evaluation of Renewable Fuels for Iron-Ore Pellet Induration. *Energy Fuels* 2019, Vol. 33. P. 7829.

<sup>18</sup> Mariana M.O.C. , Marcelo C., Esa K.V. Biomass gasification for natural gas substitution in iron ore pelletizing plants. *Renewable Energy*, 2015, Vol. 81. P. 577.

<sup>19</sup> Zhulin L., Xuegong B., Zeping G., Wei L. Carbothermal Reduction of Iron Ore in Its Concentrate-Agricultural Waste Pellets. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018. Article ID 2138268. 5 p.

This paper analyses the efficiency of using sunflower husks as an alternative fuel for pellet firing in a grate-tube furnace-cooler system at the Poltava Mining and Processing Plant (Ferrexpo Poltava Mining), Ukraine.

The schematic diagram of the firing process at the grid-tubular furnace-annular cooler installation is shown in Figure 2. Pellets are dried on the grate, as well as pre-heating zones are located, where the maximum temperatures are 1000–1100 °C. Pellets acquire mechanical strength during preheating to resist destruction in a rotating kiln where they are fired. Heating is carried out by a burner located in the discharge part of the rotary kiln.



**Fig. 2. Grid Installation Diagram – Tubular Kiln – Ring Cooler<sup>20</sup>**

The pellets are fired at a temperature of 1240–1265°C. The furnace dimensions are 6705 mm in diameter and 45720 mm in length. After firing, the pellets are sent to a ring cooler, where they are cooled to temperatures of 100–120°C and then transported to the finished goods warehouse via a conveyor system.

The pellets are produced using magnetite concentrate from the concentrator (iron content 65–67%), dolomitised limestone and bentonite. The fuel is usually natural gas.

Sunflower husks are a safe and environmentally friendly fuel. When burned, it releases the same amount of CO<sub>2</sub> as the natural decomposition of the biomass used for its production.

The storage conditions are an undeniable advantage. Sunflower husks have a low flammability, which means that they can be stored in close proximity to heating units. Since it does not absorb moisture, its ability to release heat does not decrease over time, which does not require special storage conditions. In addition, this type of fuel takes up little space, is lightweight, and is easy to transport and store.

<sup>20</sup> Grate Kiln Pelletizing Plant. Metso

Sunflower husk is an agricultural waste, a waste product of processing agricultural products with different moisture content. We use raw materials with a moisture content of up to 12%. During the first stage of cleaning, stones, roots and other foreign objects are separated. Then the raw material is sent by gravity to the drying and grinding section. Crushing involves grinding the raw material into a 2–4 mm fraction using a self-priming hammer crusher at the bottom of the unit. The raw material is then dried by rising in a hot coolant stream to a dynamic classifier located in the upper part of the drying and grinding unit. The dynamic classifier, the frequency of which is set from the control panel, passes only fine and dry raw materials, while large and wet particles of raw materials are returned down to the rotor of the unit. Thus, this process is repeated until the required moisture content and degree of grinding of the raw material is obtained. The output fraction is controlled by a sieve and the size of the hammers.

Table 5 shows the requirements for biofuels and Table 6 shows the main characteristics of sunflower husks used for calcination of iron ore pellets in the grate-tubular kiln-ring cooler unit.

Table 5

#### The requirements for biofuels

№	Indicator	Features
1	Fraction size, mm	2–4
4	Mass fraction of moist and light substances, %.	No more than 12,0
5	Ash content, %.	No more than 4,0
6	Mass fraction of fat and extractive substances in absolutely dry matter, %.	No more than 4,5
7	Calorific value, MJ/kg	No more than 16,89
8	Bulk density, kg/m <sup>3</sup>	Up to 150
9	Mass fraction of total sulphur, %	No more than 0,23
10	Mass fraction of crude fibre in terms of absolutely dry matter, %	From 35,0 to 60,0

Table 6

#### Main features of sunflower husks

Features	Indicators for sunflower husks
C, %	45.82 ± 0.08
H, %	6.32 ± 0.02
N, %	2.61 ± 0.05
S, %	0.14 ± 0.02
O, %	38.31 ± 0.08
Ash, %	6.81 ± 0.51
Combustion heat, MJ/kg	19.31 ± 0.13

To determine the impact of the introduction of the technology of replacing natural gas with biofuels, two periods were compared – when the

technological lines worked only on natural gas and the period when biofuels were used together with natural gas. Qualitative and quantitative data of plant operation are given in Tables 7 and 8.

In the experimental period, part of the natural gas was replaced with sunflower husk, the consumption of natural gas was reduced by 38–60%, and the amount of husk was added based on maintaining the required temperature of the pellets burning and the heat flow of combustion products. The productivity of the plant, the strength of the pellets and the iron content in them were determined.

It can be seen that the qualitative and quantitative indicators are approximately the same when using only natural gas and when partially replacing it with sunflower husks, so we can conclude that during the use of biofuels, quantitative and qualitative indicators remain normal. The specific gas consumption decreased by almost 50% and at the same time, this does not have any effect on the pellet production technology. At the same time, the replacement coefficient of natural gas by sunflower husks was about 1.8 kg/m<sup>3</sup>.

The maximum degree of replacement of natural gas by sunflower husks reached 60%. The specified value of the degree of replacement was achieved for conditions of low consumption of natural gas and minimum firing temperatures. With an increase in the total consumption of natural gas, it was possible to replace up to 38% of the gas with sunflower husk. This is due to the fact that with a high consumption of natural gas, a large heat flow is formed, and since the combustion rate of sunflower husks is limited, then with a large amount of husk supplied to the burner, it does not have time to burn completely in the flare zone and the heat flow and thermal profile of the pellets burning changes.

Quality indicators of the rounded materials play a decisive role in the blast furnace process and significantly affect the technical and economic performance of blast furnace smelting.

Table 7

**Process parameters of pellet production using natural gas**

Day	Natural gas specific consumption, m <sup>3</sup> /t	Capacity, t/day	Iron content in pellets, %	Strength of pellets, kg/pellet
1	2	3	4	5
1	11,8	7106,2	63,34	231
2	11,89	7555,7	63,44	231
3	12	7662,3	63,98	232
4	12	7926,3	63,98	236
5	12,09	7963,8	64,77	237
6	12,13	8055,5	64,82	237
7	12,14	8246,5	64,88	237
8	12,16	8721,3	65,01	237
9	12,21	8757,6	65,06	237
10	12,24	8803,1	65,07	241

Continuation of table 7

1	2	3	4	5
11	12,24	8805,7	65,13	248
12	12,33	8826,9	65,17	249
13	12,38	8838,7	65,17	250
14	12,52	8933,6	65,17	255
15	12,96	8954,8	65,19	255
16	13,47	9033	65,2	258
17	14,07	9072,4	65,24	258
18	14,08	9115,3	65,25	258
19	14,44	9229,3	65,33	258
20	14,49	9304,2	65,37	261
21	14,61	9381,6	65,39	263
22	14,62	9420,9	65,4	264
23	14,81	9515,8	65,42	264
24	14,82	9532,7	65,46	264
25	14,89	9606,1	65,51	265
26	15,88	9620,3	65,58	265
27	16,85	9631,6	65,6	273
28	17,01	9678,3	65,66	284
29	18,31	9772,5	65,68	284
30	18,48	9790,9	65,68	285

Table 8

**Technological indicators of pellet production using sunflower husk  
and natural gas**

Day	Natural gas specific consumption, m <sup>3</sup> /t	Capacity, t/day	Iron content in pellets, %	Strength of pellets, kg/pellet
1	2	3	4	5
1	4,64	7262	63,19	225
2	4,85	7560,3	63,29	225
3	4,99	7980,8	63,34	226
4	5,01	8348,2	63,84	232
5	5,03	8353,3	63,98	237
6	5,45	8504,1	64,65	237
7	5,59	8640,1	64,66	237
8	5,6	8689,7	64,73	241
9	5,61	8703,1	64,77	252
10	5,67	8803,1	64,77	254
11	5,71	8823,6	64,81	254
12	5,78	8838,7	64,82	255
13	5,83	8889,9	64,88	258
14	5,91	8908,4	64,96	258
15	6,02	8933,3	65	261
16	6,04	8943,7	65,01	263
17	6,25	8960,8	65,1	263
18	6,34	8971,9	65,13	264
19	6,44	8972,8	65,17	264
20	6,55	9005,8	65,19	264

Continuation of table 8

1	2	3	4	5
21	6,58	9017,8	65,33	264
22	6,86	9041,8	65,33	265
23	7,17	9059,9	65,39	265
24	7,23	9115,8	65,4	266
25	7,36	9187,1	65,42	267
26	7,74	9187,1	65,58	269
27	7,89	9210,9	65,6	273
28	8,81	9213,6	65,66	277
29	9,47	9271,6	65,68	282
30	11,01	9284,3	65,68	284

An important indicator is the content of alkali metals in iron ore materials. Exceeding the permissible content of alkali metals in materials that are loaded into the furnace domain per ton of cast iron causes a deterioration in the technological process and reduces the productivity of blast furnaces<sup>21</sup>. Increasing the content of alkaline elements by 0.1% for different operating conditions of the blast furnace increases the specific coke consumption by 15–60 kg/t of cast iron. It is definitely impossible to determine the permissible content of alkali in iron ore materials, since this value depends on the melting conditions and the content of alkali metals in other charge materials and fuels, primarily coke<sup>22</sup>.

According to the practical experience of blast furnaces, the acceptable limit of the amount of alkali metals, which is expressed as the sum of  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ , depending on the blast furnace and its operating conditions, is in a wide range from 2.5 to 8.5 kg/t of cast iron<sup>23</sup>. An important role in this case is played by the quality of the ore raw materials used, which affects the amount of alkaline elements entering the primary metallurgical processes. The  $\text{K}_2\text{O}$  content in the charge for pellets can reach a value from 0.08% to 1.5%, and the  $\text{Na}_2\text{O}$  content ranges from 0.1% to 1.2%<sup>24</sup>.

The  $\text{K}_2\text{O}$  content of sunflower seed ash can reach 25%<sup>25</sup>, but it is worth noting that there are no changes in the amount of alkaline earth metals in pellets obtained from sunflower husks. This indicates that during the firing

<sup>21</sup> Besta P., Samolejová A., Lenort R., Janovská K., Kutáč J., Sikorová A. Alkaline Carbonates in Blast Furnace Process. *Metalurgija*, 2014. V. 53 № 4. P. 551.

<sup>22</sup> Smallman R. E., Ngan A. H. W. Physical Metallurgy and Advanced Materials. Butterworth-Heinemann. 2011. P. 145-146.

<sup>23</sup> Pietsch W. Agglomeration in Industry: Occurrence and Applications. Wiley-Vch Verlag. 2008. P. 382.

<sup>24</sup> Reddy L. K. Principles of engineering metallurgy, New Age International. New Delhi. 2007. P. 198.

<sup>25</sup> Paleckienė R., Sviklas A.M., Šlinkšienė R., Štreimikis V. Complex Fertilizers Produced from the Sunflower Husk Ash. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2010. V. 19(5). P. 975.



process, compounds containing alkaline earth metals are transferred to the gas phase. However, when the gas comes into contact with the lining of a rotary kiln, such compounds can be deposited on refractories along with other elements of sunflower husk ash.

Severe fuel ash deposits on the lining of a tube furnace for the production of iron ore pellets can reduce pellet quality and production efficiency. The initial stage of ash deposit formation is crucial for the adhesion and growth of ash deposits on the refractories in the furnace. The study<sup>26</sup> modelled and experimentally investigated the peculiarities of slag deposit formation when pulverised coal is used for pellet firing. The results showed that adhesion on refractory bricks increases with a decrease in the combustion efficiency of pulverised coal and this leads to an increase in the Na<sub>2</sub>O content in the deposits, which leads to premature destruction of refractories.

However, crushed sunflower husks have a higher reactivity than coal and their combustion efficiency in pellet firing is much higher. In addition, the ash content in sunflower husks is up to 4%, which is significantly lower than in coal, where its content can reach more than 12%. This minimises ash deposits on the lining of the rotary kiln and extends its service life. No significant ash deposits on the furnace lining were observed in the operation of the grate-tube furnace-ring cooler system using sunflower husk.

The results obtained suggest the effective use of biomaterials in the production of pelletised raw materials. Expanding the types of biomaterials that can be used in pellet agglomeration and firing requires studying the behaviour of other types of biofuels, including after preliminary preparation (pelletising, pressing, pyrolysis), in terms of the possibility of replacing fuels in the pelletising of iron ore raw materials.

## CONCLUSIONS

Research has been carried out to study the impact of different types of biomaterials on the iron ore sintering process and the quality of the resulting sinter. The studies revealed that it is possible to replace up to 25% of coke fines with charcoal and up to 50% with walnut shells. At the same time, the process performance and strength of the sinter remain at an acceptable level.

The use of sunflower seed husks due to their low bulk weight in agglomeration technology is possible only if they are prepared beforehand.

The main feature of biomaterials as a fuel for sintering is bulk density, which determines the thermal parameters of the process and the structure of the sinter.

---

<sup>26</sup> Shuai W., Yufeng G., Jianjun F., Yu H., Tao J., Feng C., Fuqiang Z., Lingzhi Y. Initial stage of deposit formation process in a coal fired grate-rotary kiln for iron ore pellet production. *Fuel Processing Technology*. 2018. V. 175. P. 63.

The use of biomass will reduce the negative environmental impact of sinter plants.

The article analyses the use of sunflower husks as an alternative fuel by adding crushed husks to the already installed pellet firing system for the grate-tubular kiln-ring cooler installation for the conditions of the Ferrexpo Poltava Mining. It was found that when replacing up to 50 % of natural gas with sunflower husk, the quantitative and qualitative indicators of pellet production remained at the baseline level.

The influence of sunflower husk ash and the content of alkali metals in it on the quality of pellets and the operation of the rotary kiln was analysed. It was found that the content of alkali metals in pellets does not increase. No significant amount of ash deposition on the refractories of the rotary kiln was observed.

It is prospective to investigate the use of other types of bio-raw materials in pellet firing.

## **SUMMARY**

The steady rise in the cost of traditional energy resources and their negative impact on the environment is leading to an increase in the share of renewable energy sources worldwide. The use of biomass for energy generation based on modern technologies is environmentally safer compared to the energy use of traditional organic resources such as coal. A significant reserve for increasing the use of energy from biomass is concentrated in the metallurgical industry, including the production of pelletised iron ore. Research has been carried out to study the impact of different types of biomaterials on the sintering process of iron ore and the quality of the resulting sinter. The study found that, provided that the process performance and sinter quality are maintained at the appropriate level, it is possible to replace up to 25% of coke fines with charcoal and up to 50% with walnut shells. An analysis of the use of sunflower husks as an alternative fuel was carried out by adding them to the already installed pellet firing system for the grate-tubular kiln-ring cooler installation. It was found that when replacing up to 50 % of natural gas with sunflower husks, the quantitative and qualitative indicators of pellet production remained at the baseline level.

## **Bibliography**

1. December 2022 crude steel production and 2022 global crude steel production totals. *World Steel Association AISBL*: веб-сайт. URL: <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2023/december-2022-crude-steel-production-and-2022-global-totals/> (дата звернення: 28.09.2023).

2. Гелету́ха Г., Желе́зна Т. Біоенергетика замість газу. *Економічна правда*: URL: веб-сайт. <http://www.epravda.com.ua/publications/2015/01/9/520368/> (дата звернення: 03.09.2023).

3. Практичний посібник з використання біомаси в якості палива у муніципальному секторі України (для представників агропромислового комплексу). Агентство з відновлювальної енергетики. Київ, 2017. 70 с.

4. Suorajärvi H., Kemppainen A., Haapakangas J., Fabritius T. Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes. *Journal of Cleaner Production*. 2017. V. 148. P. 709-734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.02.029.

5. Ooi T. Ch., Aries E., Ewan B.C.R., Thompson D., Anderson D.R., Fisher R., Fray T., Tognarelli D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Minerals Engineering*. 2008. V. 21. P. 167-177. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.09.005.

6. Gan, M., Fan, Xh., Jiang, T. Fundamental study on iron ore sintering new process of flue gas recirculation together with using biochar as fuel. *Journal of Central South University*. 2014. 21. P. 4109–4114. DOI: 10.1007/s11771-014-2405-6

7. Wei R., Zhang L., Cang D., Li J., Li X., Xu C.C. Current status and potential of biomass utilization in ferrous metallurgical industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. V. 68. P. 511-524. DOI: 10.1016/j.rser.2016.10.013.

8. Mok Y.S., Nam I. Positive pulsed corona discharge process for simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from iron-ore sintering flue gas. *IEEE Trans Plasma Sci*. 1999. V. 27. P. 1188-1196. DOI: 10.1109/27.782299.

9. Ooi T. Ch., Aries E., Ewan B.C.R., Thompson D., Anderson D.R., Fisher R., Fray T., Tognarelli D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process *Minerals Engineering*. 2008. V. 21. P. 167-177. DOI: 10.1016/j.mineng.2007.09.005.

10. Kawaguchi T., Hara M. Utilization of biomass for iron ore sintering. *ISIJ International*. 2013. V. 53. № 9. P. 1599-1606. DOI: 10.2355/isijinternational.53.1599

11. Norgate T., Haque N., Somerville M., Jahanshahi S. Biomass as a Source of Renewable Carbon for Iron and Steelmaking. *ISIJ International*. 2012. Vol. 52. № 8. P. 1472-1481. DOI: 10.2355/isijinternational.52.1472.

12. European Commission. EUR 25151 – Alternate carbon sources for sintering of iron ore (Acasos). Research Fund for Coal and Steel. Final report. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*. 2013, 71 p. DOI: 10.2777/58105.

13. Zhang X., Zhong Q., Liu C., Rao M., Peng Z., Li G., Jiang T. Partial substitution of anthracite for coke breeze in iron ore sintering. *Scientific Reports*. 2021. 11:1540 DOI: 10.1038/s41598-021-80992-4.

14. Ковальов Д.А., Ванюкова Н.Д., Івашенко В.П. Ягольник М.В., Бойко М.М. Фізико-хімічні процеси виробництва окускованої сировини. Ч. 1. Теоретичні основи огрудкування залізорудних матеріалів: Конспект лекцій. Дніпропетровськ НМетАУ, 2007. 51 с.
15. Kieush L., Yaholnyk M., Boyko M., Koveria A., Ihnatenko V. Study of Biomass Utilization in the Iron Ore Sintering. *Acta Metallurgica Slovaca*, 2019. Vol. 25. P. 55-64. DOI: 10.12776/ams.v25i1.1225
16. Lina Kieush, Maksym Boyko, Andrii Koveria, Maksym Yaholnyk, Natalia Poliakova Manganese Sinter Production with Wood Biomass Application. *Key Engineering Materials*, 2020. Vol. 844. P 124-134. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.844.124
17. Henrik Wiinikka, Alexey Sepman, Yngve Ögren, Bo Lindblom, and Lars-Olof Nordin. Combustion Evaluation of Renewable Fuels for Iron-Ore Pellet Induration. *Energy Fuels* 2019, Vol. 33. P. 7819–7829. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01356
18. Mariana M.O.C., Marcelo C., Esa K.V. Biomass gasification for natural gas substitution in iron ore pelletizing plants. *Renewable Energy*, 2015, Vol. 81. P. 566-577. DOI: 10.1016/j.renene.2015.03.056
19. Zhulin L., Xuegong B., Zeping G., Wei L. Carbothermal Reduction of Iron Ore in Its Concentrate-Agricultural Waste Pellets. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018. Article ID 2138268. 6 p. DOI: 10.1155/2018/2138268
20. Grate Kiln Pelletizing Plant. Metso: веб-сайт. URL: <https://www.metso.com/ru/portfolio/grate-kiln-pelletizing-plant/> (дата звернення: 29.09.2023).
21. Zubkova V., Strojwas A., Bielecki M., Kieush L., Koverya A. Comparative study of pyrolytic behavior of the biomass wastes originating in the Ukraine and potential application of such biomass. Part 1. Analysis of the course of pyrolysis process and the composition of formed products. *Fuel*, 2019. V. 254. P. 115688. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115688
22. Besta P., Samolejová A., Lenort R., Janovská K., Kutáč J., Sikorová A. Alkaline Carbonates in Blast Furnace Process. *Metalurgija*, 2014. V. 53 № 4. P. 549-552.
23. Smallman R. E., Ngan A. H. W. Physical Metallurgy and Advanced Materials. Butterworth-Heinemann. 2011. P. 650. DOI: 10.1016/B978-0-7506-6906-1.X5000-8
24. Pietsch W. Agglomeration in Industry: Occurrence and Applications. Wiley-Vch Verlag. 2008. P. 834.
25. Reddy L. K. Principles of engineering metallurgy, New Age International. New Delhi. 2007. P. 260.

26. Paleckienė R., Sviklas A.M., Šlinkšienė R., Štreimikis V. Complex Fertilizers Produced from the Sunflower Husk Ash. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2010. V. 19(5). P. 973-979.

26. Shuai W., Yufeng G., Jianjun F., Yu H., Tao J., Feng C., Fuqiang Z., Lingzhi Y. Initial stage of deposit formation process in a coal fired grate-rotary kiln for iron ore pellet production. *Fuel Processing Technology*. 2018. V. 175. P. 54–63. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.03.005

**Information about the authors:**

**Boiko Maksym Mykolayovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Iron and Steel Metallurgy

Ukrainian State University of Science and Technologies

2, Lazaryan Str., Dnipro, 49010, Ukraine

**Petrenko Vitalii Oleksandrovysh,**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,

Acting Head of the Department of Intellectual Property

and Project Management

Ukrainian State University of Science and Technologies

2, Lazaryan Str., Dnipro, 49010, Ukraine

## STUDY OF THE PROCESS OF BREAKING ROLLED STEEL BY BENDING FOR STAMPING UNDER IMPACT AND COMBINED LOADING

Karnaukh S. G., Markov O. Ye.

### INTRODUCTION

At the present stage of mechanical engineering development, the problem of energy resources and metal economical use during its processing specifies ever increasing requirements to technology and equipment for separating raw materials into workpieces. This requires the development of already known and the creation of new effective separation processes and equipment for their implementation<sup>1</sup>.

At every engineering enterprise, the rolled stock separating is typical and massive. Considering that ten millions of workpieces from rolled stock are produced every month in the world, the relevance of works aimed at improving the existing and developing new technologies for the production of workpieces becomes evident. Among the known methods of separating of rolled stock into dimensional workpieces, used in modern procurement production, the most productive and economical ones are waste-free methods of separating rolled stock. They are cutting by shearing and cold breaking by bending. During this time, a large amount of material has been accumulated on the destruction nature, mechanisms and criteria<sup>2</sup>. The following scientists made a significant contribution to the development of this science: K. Kessler, O. Keller, T. Nakagawa, T. Ekobori, E. Orovan, G. V. Kolosov, M. I. Muskhelishvili, G. I. Barenblatt, M. Ya. Leonov, S. O. Khristianovich, G. P. Cherepanov, V. V. Panasyuk, O. I. Tselikov, K. M. Bogoyavlensky, V. G. Kononenko, V. M. Finkel, V. T. Meshcherin, V. P. Romanovsky, S. S. Solovtsov, N. L. Lisunets, V. A. Timoshchenko and many others<sup>3</sup>.

### 1. Analysis of literature data and goal setting

In this paper, a method of separating rolled stock using cold breaking by bending is considered. The idea of the method consists in a preliminary stress

---

<sup>1</sup> Tang B., Liu Y., Mao H. Investigation of a novel modified die design for fine-blanking process to reduce the die-roll size. *Procedia Engineering*. 2017. №207, P. 1546–1551. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.1076.

<sup>2</sup> Joun M. S., Jeong S. W., Park Y. T., Hong S. M. Experimental and numerical study on shearing of a rod to produce long billets for cold forging. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. №62. P. 797–805. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.12.062.

<sup>3</sup> Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. №17. P. 34–38.

concentrator applying to the rolled stock and bending of the rolled stock until it breaks in the stress concentrator. A brittle crack in terms of its potential is an ideal tool for waste-free separation of solid materials into parts. At the same time, the energy consumption for cutting is approaching to its minimum possible theoretical level<sup>4</sup>. However, the widespread adoption of this separation method is hindered by the unstable nature of crack propagation. This leads to a low quality of the resulting workpieces.

The development and application of effective methods of destruction control can significantly improve the method of breaking of rolled stock into workpieces and also create fundamentally new methods suitable for obtaining workpieces for machining. They are based on understanding the reasons leading to undesirable fracture deviations from a given trajectory. This allows to propose effective ways to improve the quality of the resulting surface.

Promising trends for improving breaking by bending are increasing the loading rate and creating a complex stress state that impedes plastic flow in the fracture area. The papers shows that an increase in the loading rate changes the behavior of the metal and also the nature of plastic deformation and fracture, the stress-strain state of the metal, the ratio of the plastic stage and the stage of destruction, the shape and size of the deformation zone. This ensures the minimum possible level of plastic deformation, which precedes the initiation of the main crack, and low energy consumption of the process.

However, in the process of shock loading at high rates, the bending of the specimen is accompanied by elastic deformations and vibrations at the contact with the supports and the tool. In this case, the fracture process becomes uncontrolled due to the instability of the crack trajectory<sup>5</sup>. Insufficient information about the causes of this phenomenon and possible methods of dealing with it contributes to the belief that supercritical destruction is an uncontrolled process. It cannot be used for high-quality separating of rolled stock into workpieces<sup>6</sup>. This is explained, among other things, by the complexity of describing the destruction dynamics, and by the prevailing disproportion between the development of theoretical and experimental methods for studying the cracks propagation in dynamic fracture mechanics.

It is also necessary to take into account the inertial loads arising from the displacement and rotation of the specimen halves in the process of separation using the method of breaking by bending.

---

<sup>4</sup> Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye Metally*. 2018. №6. P. 31–35.

<sup>5</sup> Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. № 109. P. 2457–2464. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05824-7>.

<sup>6</sup> Zheng Q., Zhuang X., Zhao Z. State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering*. 2019. №13. P. 61–70.

To solve this problem, it is proposed to load the specimen with a static force before separation. This allows to provide the initial displacement of the specimen in contact with the supports and to reduce the vibration of the specimen and the tool. The possibility of preliminary static loading in combination with a high deformation rate allows to create a complex stress state scheme in the specimen, which provides the required geometric accuracy and quality of the resulting workpieces.

In the papers<sup>7</sup>, mathematical models of the specimen separation in the plane of the stress concentrator are proposed. Existing design models have been developed for impact tests on pendulums and hammers, when the mass of the movable tool is much greater than the mass of the specimen. In this case, during impact, there is no significant reduction in the speed of the moving parts. On a press-hammer, the mass of the intermediate punch can be commensurate with the mass of the specimen. Therefore, it is necessary to take into account the change in the punch speed during loading.

In the papers<sup>8</sup>, the well-known model of specimens' impact testing for concentrated bending with an elastic-plastic hinge was used. In the study of plastic flow in the separation plane at three-point bending, conclusions are drawn. Despite the change in the zone of plastic deformation, with an increase in the angle of rotation in the central region, a rigid zone is formed, bounded by the shear strain rate rupture lines. With respect to this zone, which is an elastic-plastic hinge, the halves of the specimen rotate. The known model is applicable only for cold bending breaking, when the angle of the specimen rotation halves before fracture is small and brittle fracture occurs through crack propagation without significant plastic deformation.

Analysis of the known fracture models and the proposed complex model of specimen fracture establishes that the behavior of a crack depends on a number of uncontrolled factors. The task becomes more complicated with dynamic and static-dynamic loading, when it is extra necessary to take into account the influence of the equipment design parameters.

The papers<sup>9</sup>, consider numerical modeling of experiments to determine the dynamic crack resistance of materials. It is shown that for impact testing of specimens according to the three-point bending scheme, a significant simplification of the procedure for determining the basic solutions is possible.

---

<sup>7</sup> Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. №3. P. 107–114.

<sup>8</sup> Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. №3. P. 107–114.

<sup>9</sup> Карнаух С. Г., Бігунов О. О., Мучник О. Є. Дослідження процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою триточкового холодного ламання згином на прес-молотах. *Машинознавство*. 2000. №12. С. 31–36.



This becomes possible when using the theories of Euler – Bernoulli or Timoshchenko. In this case, the presence of a crack is modeled by introducing an additional angle of rotation in the corresponding section. The data obtained with this approach correlate adequately with the experimental data, which also testifies in favor of the chosen model of impact tests with a flexure hinge.

The papers<sup>10</sup> presents a complex mathematical model of the specimen static-dynamic loading according to the scheme of three-point bending on a press-hammer with the same direction of deforming forces. It differs from the known models by taking into account the preliminary static loading and design features of the press-hammer. In this case, at the moment of impact, the speed of the tool is equal to the speed of the moving parts. On press-hammers, the mass of the intermediate punch can be comparable to the mass of the specimen, and its speed at the moment of impact is equal to zero. The intermediate punch accelerates upon impact simultaneously with the deformation of the specimen; therefore, it is necessary to take into account the change in the punch speed during loading.

The purpose of the work is to improve the quality of workpieces obtained by breaking rolled stock by studying the separation process under dynamic and static-dynamic loading on a press-hammer.

## **2. Mathematical modeling of the dynamic and static-dynamic breaking of rolled stock according to the three-point bending scheme**

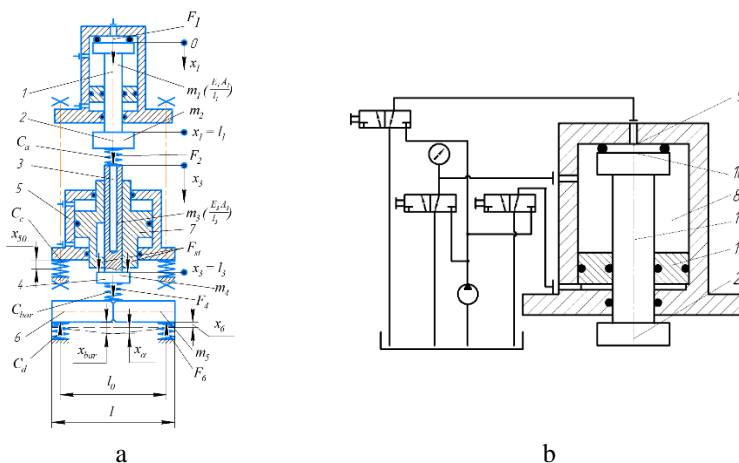
Dynamic and static-dynamic loading of rolled stock can be carried out on a press-hammer. The Fig. 1 shows a diagram of the static-dynamic loading of specimens according to the three-point bending scheme on a press-hammer. The press-hammer has the following advantages: the ability to create quasi-static, shock and combined loads in a wide range of rates, energies and forces; precise metering of energy and force during deformation of the rolled stock, etc.<sup>11</sup>

Dynamic loading of the specimen 6 is carried out by a hydroelastic cylinder, which uses a previously compressed liquid as an energy accumulator. The pump (Fig. 1, b) creates pressure in the working chamber 8 of the hydroelastic cylinder. When a predetermined pressure value is reached, the control cavity 9 is cut off from the overflow and connected to the pumping under pressure.

---

<sup>10</sup> Karnaukh S. G., Aliiev I. S. Research of process of division of grade rolling on the measured blanks by method of breaking bend at static and shock loading. *Scientific journals of Vinnitsa national agrarian university. Engineering, energy, transport*. 2021. Vol.112, № 1. С. 81–87. doi: 10.37128/2520-6168-2021-1-10.

<sup>11</sup> Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. V. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. №120. P. 2763–2776. doi: 10.1007/s00170-022-08902-0.



**Fig. 1. Schematic diagram of a press-hammer: a – calculation scheme of specimen with dynamic and static-dynamic loading by the method of cold breaking by bending on a press-hammer; b – construction diagram of a press-hammer hydroelastic cylinder**

There is a loss of sealing in the control cavity 9. The working fluid under high pressure affects the whole area of the top end 10 of the rod 1. The rod 1, together with the head 2, is rapidly moving down. At the same time, it loads the intermediate punch 3 with a punch 4, installed along the axis of the hydraulic cylinder 5 (Fig. 1, a). Under the shock loading, the specimen 6 is broken by bending.

To implement the static-dynamic loading mode, a plunger 7 is provided in the design of the press-hammer (see Fig. 1, a). The plunger 7 moves under the action of high fluid pressure in the hydraulic cylinder 5 and acts on the end face of the punch 4. In this case, a preliminary static loading of the specimen 6 occurs in the same direction with its final separation. After that, dynamic (shock) loading of the specimen 6 occurs before fracture. The press-hammer cycle is reproduced.

The movement of the rotating parts (see Fig. 1, a) occurred under the action of the drive force  $F_1 = f[U_1(x_1 = 0)]$ , where  $U_1$  is the rod movement the section  $x_1$ . Intermediate punch 3 with the mass  $m_3$  was presented in the form of a variable cross-section rod with parameters  $A_3(x_3)$ , elasticity modulus  $E_3$ , length  $l_3$ , and punch 4 had the form of the concentrated mass  $m_4$ . The impact time  $1 \dots 2 \text{ ms}$  is small as compared to the period of natural longitudinal oscillations of the intermediate punch section. Therefore, for the correctness of the mathematical model, it is necessary to take into account the wave processes occurring in the intermediate punch. Since the length of the

punch  $l_3$  is commensurate with the length of the rod  $l_1$ . It was assumed that the dependence of the change in force at the contact between head 2 and intermediate punch 3 on deformation  $F_2 = f_2(\Delta_2)$  is nonlinear. Linearized stiffness of the contact between head 2 and intermediate punch 3 –  $C_a = \text{const}$ . Technological force  $F_4 = f_4(\Delta_4)$  is applied in the middle to specimen 6 with mass  $m_4$ , located on two supports. The element stiffness  $C_{bar} = \text{const}$  reflects the elastic properties at the contact of the specimen with the punch. Two symmetric elements with stiffness  $C_d = \text{const}$  simulate the elastic properties in the contact of the supports with the specimen and act on the specimen by  $F_6$  forces. Such modeling of the supports influence on the specimen by two equal forces  $F_6$  is coherent with experiment. In the static-dynamic loading mode at the first stage, the specimen 6 with the stiffness  $C_{bar} = \text{const}$  is loaded by the static force  $F_{st}$  of the hydraulic cylinder 5, which causes deformation of the engine bed elements, which has the stiffness  $C_c = \text{const}$ .

The proposed complex model of the specimen static-dynamic loading according to the scheme of three-point bending on a press-hammer, partially used the well-known model of specimen impact testing for concentrated bending with an elastic hinge, characterized by the presence of initial deformations of sections under the action of a preliminary static force. A specimen of  $m_5$  mass was presented in the form of two rigid halves connected to each other by an elastic hinge, the rotation angle  $\alpha$  of which is proportional to the bending moment  $M_{curv}$  in the central section:

$$M_{curv} = \alpha \cdot l_0^2 \cdot (8 \cdot C_{bar}), \quad (1)$$

where  $\alpha$  – rotation angle of specimen halves;

$l_0$  – distance between supports;

$E$  – elasticity modulus of specimen material;

$C_{bar}$  – static stiffness of the specimen:

$$C_{bar} = d \cdot E / (\lambda \cdot (a/d)), \quad (2)$$

where  $d$  – specimen diameter;

$E$  – elasticity modulus of specimen material;

$\lambda$  – dimensionless specimen calibration factor;

$a$  – crack length.

The equation of motion for an arbitrary section of masses  $m_1, m_3$  is:

$$\partial^2 U_i / \partial t^2 = c_i^2 \cdot [(1/A_i) \cdot (\partial A_i / \partial x_i) \cdot (\partial U_i / \partial x_i) + (\partial^2 U_i / \partial x_i^2)], i = 1, 3 \quad (3)$$

where  $U_i$  – section displacement  $i$  – that core;

$c_i$  – speed of sound in metal.

The differential equations of concentrated masses motion  $m_2, m_4$ :

$$m_i \cdot (d^2x_i/dt^2) + F_{ai}(\Delta_{ai}) - F_{bi}(\Delta_{bi}) = 0, i = 2, 4, \quad (4)$$

where  $x_i$  – mass motion  $m_i$ ;

$F_{ai}(\Delta_{ai}), F_{bi}(\Delta_{bi})$  – forces acting on  $i$  – mass  $m_i$  from the side of the elements in contact with it, located on opposite sides;

$\Delta_{ai}, \Delta_{bi}$  – absolute deformations of the corresponding elastic elements.

For the head –  $m_2$ :

$$F_{a2} = E_1 \cdot A_1 \cdot (\partial U_1 / \partial x_1)|_{x_1=l_1}; \quad (5)$$

$$F_{b2} = f[U_1|_{x_1=l_1} - U_3|_{x_3=0}] \text{ under } U_1|_{x_1=l_1} > U_3|_{x_3=0}, \quad (6)$$

otherwise  $F_{b2} = 0$ , since there is a violation of the contact between the elements of the system, and in the case of a linear dependence

$$F_{b2} = C_a \cdot [U_1|_{x_1=l_1} - U_3|_{x_3=0}]. \quad (7)$$

For the punch –  $m_4$ :

$$F_{a4} = E_3 \cdot A_3 \cdot (\partial U_3 / \partial x_3)|_{x_3=l_3}; \quad (8)$$

$$F_{b4} = f[U_3|_{x_3=l_3} - x_{bar}] \text{ при } U_3|_{x_3=l_3} > x_{bar}, \quad (9)$$

Otherwise  $F_{b4} = 0$ , and in the case of a linear dependence

$$F_{b4} = C_b \cdot [U_3|_{x_3=l_3} - x_{bar}]. \quad (10)$$

In addition to the equations of the rotating parts and the intermediate punch motion, the equations of forces and moments in the central section were written taking into account the inertial components arising under shock loading. Within the framework of the proposed mathematical model for the specimen deformation according to the three-point bending scheme, we obtain the system of equations

$$\begin{cases} M_{curv} = (m_5 \cdot l \cdot \ddot{x}_{bar}/8) - (m_5 \cdot l^2 \cdot \ddot{\alpha}/24) + (F_6 \cdot l_0/2); \\ F_4 - 2 \cdot F_6 = m_5 \cdot \ddot{x}_{bar} - (\ddot{\alpha}/4 \cdot l \cdot m_5); \\ F_4 = C_{bar} \cdot (x_4 - x_{bar}), \text{ at } x_4 > x_{bar}; \\ F_6 = C_d \cdot (x_{bar} - \alpha/2 \cdot l_0), \text{ at } x_{bar} > \alpha/2 \cdot l_0, \end{cases} \quad (11)$$

where  $l$  – specimen length;

$\ddot{x}_{bar}$  – acceleration of specimen halves;

$\ddot{\alpha}$  – angle acceleration of specimen halves.

After transformations and substitutions, we obtain the system of equations:

$$\begin{cases} \ddot{x}_{bar} = -(6 \cdot l_0 \cdot C_{bar} \cdot x_{bar} / (m_5 \cdot l)) + (C_{bar} \cdot l_0 / (4 \cdot C_d) - l/3 + l_0/2) \times \\ \quad \times 6 \cdot F_6 / (m_5 \cdot l) + F_4 / m_5; \\ \ddot{\alpha} = -(12 \cdot l_0^2 \cdot C_{bar} \cdot \alpha / (m_5 \cdot l^2)) + 24 / (m_5 \cdot l) \times \\ \quad \times (2 \cdot l_0 / l - 1) \cdot F_6 + 12 / (m_5 \cdot l) \cdot F_4. \end{cases} \quad (12)$$

In accordance with the method of initial parameters in the Cauchy form, the displacements of the «press-hammer – specimen» elements in local coordinates were considered. To switch to a common coordinate system, its origin was aligned with the position of the contact point between the specimen and the support before static loading. Then, the initial displacements of the specimen central section –  $x_{bar0}$ , masses  $m_4$ , bed deformation –  $x_{50}$  occurred under the action of the static force  $F_{st}$ . Taking into account the displacement of the rod sections due to the action of the force  $F_{st}$ , the origin of the local coordinate system of the rod was shifted by the value  $(U_{1max} + x_{50})$  so that the movement at the contact between the head and the intermediate punch at the moment of impact was equal to the static one. The total shift of the central section of the specimen was determined as:  $x_{bar} = x_6 + x_\alpha$ .

When solving this problem, the finite difference method was used, which is well suited for similar calculations. The derivatives were approximated by finite differences using a «cross» pattern.

The calculation of the dynamic and static-dynamic cold breaking by bending on a press-hammer of original design was carried out using the developed program «Impactbreaking». Press-hammer parameters: impact energy  $W = 0 \dots 1300 \text{ J}$ ; static drive force  $F_{st} = 0 \dots 100 \text{ kN}$ ;  $F_1 = 0 \dots 12 \text{ kN}$ ;  $F_4 = 0 \dots 80 \text{ kN}$ ;  $m_2 = 2,00 \text{ kg}$ ;  $m_2 = 0,22 \text{ kg}$ ;  $l_1 = 155 \text{ mm}$ ;  $l_3 = 206 \text{ mm}$ ;  $C_a = 100 \dots 500 \text{ MN/m}$ ; speed of moving parts of the press-hammer  $V = 0 \dots 20 \text{ m/s}$ . Specimen parameters:  $d = 16 \text{ mm}$ ;  $l = 76 \text{ mm}$ ;  $l_0 = 60 \text{ mm}$ ;  $E = 2,05 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ;  $m_5 = 0,25 \text{ kg}$ . Calculations were carried out for steel specimens C45 with stiffness in the plane of separation –  $C_{bar} = 5,5 \text{ MN/m}$ , which was determined by calculation by the formula (2).

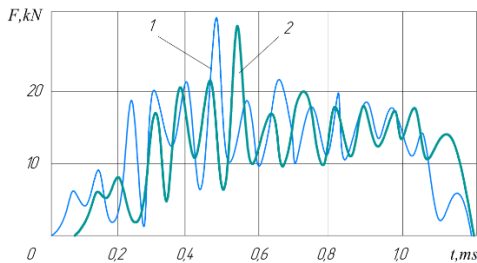
The way of modeling the contact conditions between the specimen and the supports significantly affects the obtained results. Therefore, based on the available loading scheme and recommendations, it was assumed that the shape of the contact surface of the intermediate punch corresponds to the shape of the supports –  $C_{bar} = C_d = 120 \text{ MN/m}$ .

The values of the cross-sectional areas of the rod 1 and the intermediate punch 3 along the length were set in the points ( $i = 0 \dots n$ ) of computational grid ( $n_1 = 31, n_2 = 34$ ), where  $n$  – the number of points.

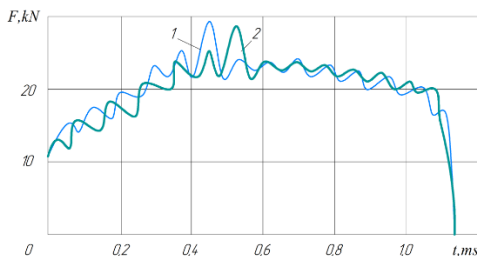
The influence of the static force  $F_{st}$ , the contact stiffness of the head 2 and the intermediate punch 4 –  $C_a$  on the shape of the change, the amplitude values of the forces  $F_4, F_6$  and the corresponding displacements of the system elements (Fig. 2) was studied.

Graph analysis  $F_4 = f(t)$  и  $F_6 = f(t)$  shows, that in the absence of static loading at the initial moment of time, the specimen is detached from the supports (see Fig. 2, a).

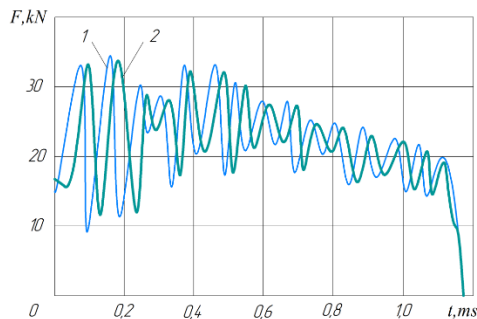
Thus, the loading scheme at the initial time is actually unsupported –  $F_6 = 0$ .



a



b



c

**Fig. 2. Mathematical curves for the forces change in the contact of punch with  $F_4 = f(t)$  and total reaction of supports  $F_6 = f(t)$ :**  
**a – shock loading  $C_a = 100 \text{ MN/m}$ ; b – static-dynamic loading  $F_{st} = 12 \text{ kN}, C_a = 100 \text{ MN/m}$ ; c – static-dynamic loading  $F_{st} = 17 \text{ kN}, C_a = 500 \text{ MN/m}$**

The deformation process during three-point bending occurs with bending vibrations of the specimen, which are overlapped with vibrations of a higher frequency, associated with the specimen contact zone compliance to an intermediate punch and supports, and the natural frequency of system elements vibrations.

The presence of a static load  $F_{st}$  at the moment of impact (see Fig. 2, b) leads to a smoother loading of the specimen, sharp peaks of forces on the mathematical curves disappear. An increase in the static component  $F_{st}$  leads to an increase in the amplitude of the forces  $F_4, F_6$  (see Fig. 2, c), although the maximum value of the amplitude for shock loading is higher due to the presence of forces peak values. The averaged forces values  $F_4, F_6$  slightly increase with the growth of the static component  $F_{st}$ .

The value of the static load  $F_{st}$ , necessary to prevent the separation of the specimen 6 from the supports, increases with the increase in the stiffness of the contact between the head 2 and the intermediate punch 3 –  $C_a$  (see Fig. 2, c).

An increase in the static force  $F_{st}$  causes a proportional increase in the initial bending angle of the specimen 6 –  $\alpha$ . This reduces the time  $t_{max}$  to reach the maximum bending angle  $\alpha_{max}$ , the value of which should be limited within  $0,14 \text{ rad}$  to ensure the quality of the resulting workpieces.

Analysis of the graphs  $F_4 = f(t)$  and  $F_6 = f(t)$  for different values of  $C_a$  (see Fig. 2) shows that a decrease in the stiffness of  $C_a$  smoothes the curves. At high values of  $C_a$ , the deformation of the specimen occurs after several collisions of the moving parts with the intermediate punch. The design of the intermediate punch determines its mass and contact stiffness –  $C_a$ . The required compliance of the punch can be ensured by increasing its length, reducing the cross-sectional area due to axial drilling, the shape of the contact surface, and the use of elastic inserts.

### **3. Experimental studies of the separating long products according to the three-point bending scheme under dynamic and static-dynamic loading**

To test theoretical calculations, experimental studies of the separating long products according to the scheme of three-point cold breaking by bending under dynamic and static-dynamic loading were carried out.

For the experiments, the previously considered press-hammer of the original design was applied using the parameters presented above:  $W = 0 \dots 1300 \text{ J}$ ; hydraulic cylinder force 5 (see Fig. 1, a) –  $F_{st} = 0 \dots 100 \text{ kN}$ ;  $V = 0 \dots 20 \text{ m/s}$ ; compressible working fluid volume  $Q = 12 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ ; working fluid pressure  $p = 0 \dots 18 \text{ MPa}$ ;  $m_2 = 2,00 \text{ kg}$ . The stiffness of the contact between the head and the intermediate punch –  $C_a = 100 \text{ MN/m}$ .

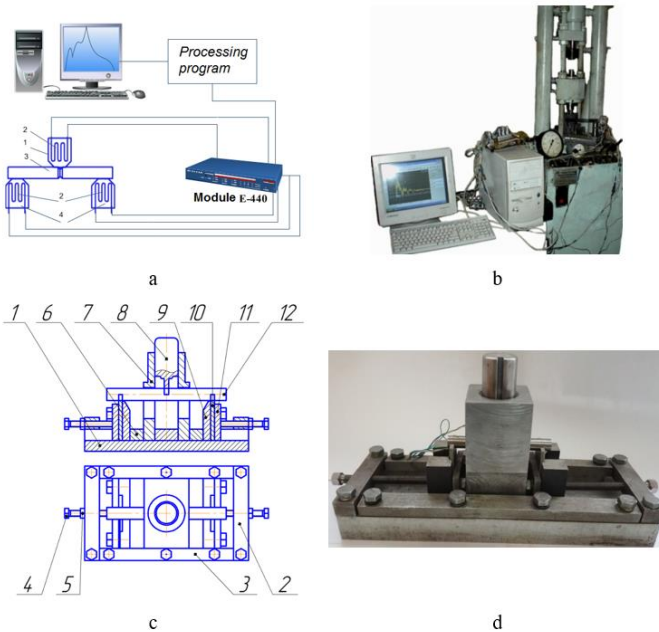
The Fig. 3 shows: the scheme of data registration during experiments (Fig. 3, a): 1 – breaker, 2 – strain indicator, 3 – specimen, 4 – supports;

construction diagram (Fig. 3, b), including photographs of the press-hammer (Fig. 3, c) and equipment (Fig. 3, d).

The installation for separating specimens by the method of cold breaking by bending (see Fig. 3, c) consists of: engine bed 1, in its guides there are breaker mechanisms and supports. The breaker and supports are installed with the possibility of reciprocating movement, limited by detents 2 and straps 3, which are attached to the engine bed 1 with screw-bolts. The position of the clamping mechanism, breaker and supports is fixed using bolts 4 screwed into stops 2, nuts 5 and spacers 6. The breaker mechanism consists of a body 7, the breaker itself 8, installed with the possibility of reciprocating movement in the guides of the body. The support mechanism consists of a body 9 and a supporting plate 10, which is held by a strap 11. Specimen 12 is placed on the supports 10.

The stiffness of contact between breaker 8 and specimen 12 is  $C_{bar} = 120 \text{ MN/m}$ , the rigidity of the specimen 12 contact with the supports 10 is equal to  $C_d = 120 \text{ MN/m}$ .

The information from the strain indicators through the  $E - 440$  universal multi-channel data collection device was fed to a computer, where, after processing using the original program, it was stored in worksheets and graphics convenient for subsequent analysis.



**Fig. 3. The registration scheme of experimental data (a), structural scheme (b) and photographs of experimental equipment (c) and setup (d)**



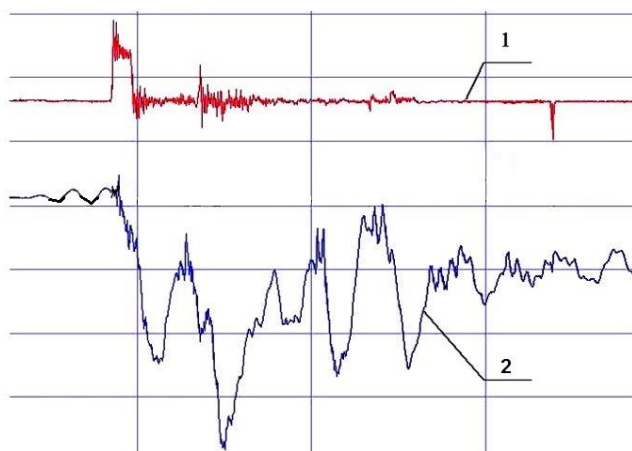
Main characteristics of the *E – 440* recorder: digital signal processor *ADSP – 2185M* with a clock frequency of  $48\text{ MH}$ ; 16 differential channels or 32 channels with common ground for analog input with automatic zero correction; the maximum operating frequency of the  $14\text{ – bit ADC}$  is  $400\text{ kH}$ , which allows to use this device for studying shock processes.

A several recording channels, signals were simultaneously recorded through two channels: on the breaker and on the supports (see Fig. 3, a).

In the experiment, we used cylindrical specimens with dimensions:  $= 16\text{ mm}$ ;  $l = 76\text{ mm}$ ;  $l_0 = 60\text{ mm}$ ;  $m_5 = 0,25\text{ kg}$ , made of rolled stock from different grades of steel in plastic – *C20*, elastoplastic – *C45*, *37Cr4* and brittle state – *60Si7*.

The specimens were preliminary applied with the stress concentrators in the form of an annular groove of a triangular profile using a turning tool. The following parameters are: depth  $\Delta H = 1,5\text{ mm}$ ; apical radius –  $\Delta r = 0,15\text{ mm}$ . Loading arms –  $30\text{ mm}$ . The sizes of the deformation and fracture zones of the specimens were determined by analyzing the fracture surface using a microscope.

Specimens under dynamic loading were separated by the breaking method according to the three-point bending scheme at the pressure of the working fluid  $p = 15\text{ MPa}$ , which corresponds to the maximum impact speed –  $V = 18\text{ m/s}$ . Typical oscillograms of specimens cold breaking according to the three-point bending scheme under dynamic loading are shown in Fig. 4.

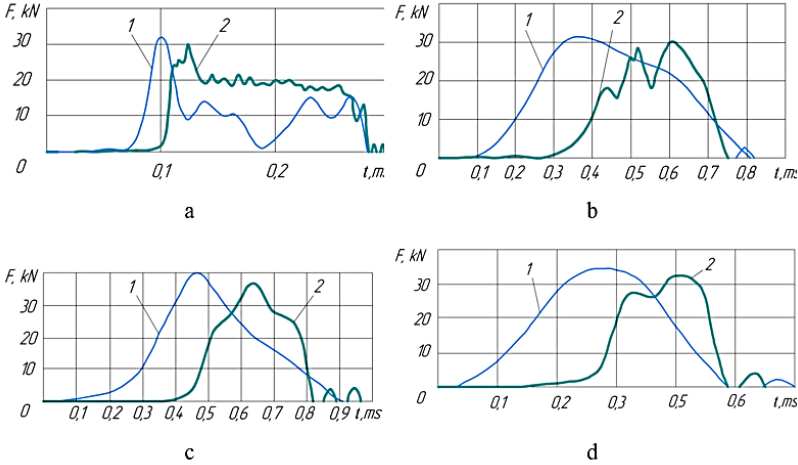


1 – support; 2 – breaker

**Fig. 4. Typical oscillogram of the time dependence on the breaker forces and supports (readings of three channels taken simultaneously) for steel *60Si7* (X – axis – time, scale –  $10^5$  measurements in  $1\text{ s}$ )**

The smoothed graphs of the change in the force parameters of the three-point bending as a function of time for specimens of different materials under dynamic loading are shown in Fig. 5.

Analysis of the experimental results (see Fig. 5) shows the absence of contact between specimen 15 and supports 13 in the initial phase of loading. The reason for the separation of the specimen from the supports is the inertia of its halves and the high stiffness of the supports with a relatively low stiffness of the specimen.



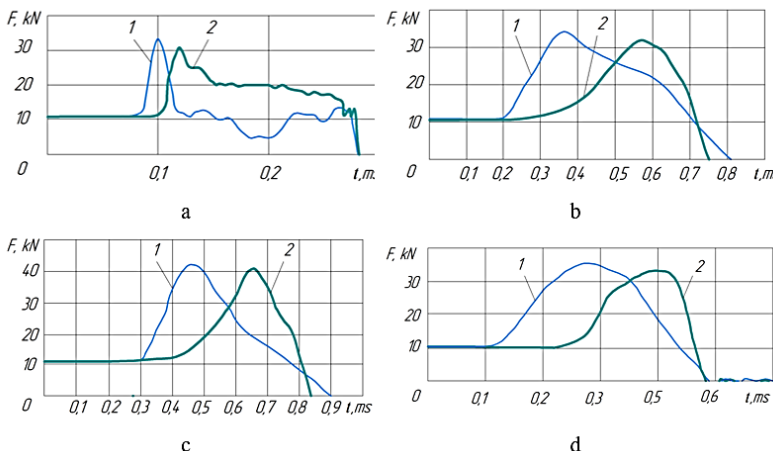
**Fig. 5. Experimental data of the change in forces at the contact of the breaker with the specimen  $F_4 = f(t) - 1$  and total reaction of supports  $F_6 = f(t) - 2$  (readings of two channels taken simultaneously) for steel specimens: a – C20; b – C45; c – 37Cr4; d – 60Si7 under dynamic loading**

This confirms the conclusion that at the initial moment of time the specimen is detached from the supports. Maximum values of forces:  $F_4 \cong 32 \text{ kN}$ ,  $F_6 \cong 30 \text{ kN}$  (steel C45) slightly differ from those calculated above, in accordance with the developed mathematical model:  $F_4 \cong 29 \text{ kN}$ ,  $F_6 \cong 28 \text{ kN}$ . The somewhat overestimated experimental results are explained by a more correct calculation of the specimen stiffness  $C_{bar}$  in the plane of separation and stiffness of the contact between the head and the intermediate punch –  $C_a$ .

The time during which the destruction process occurs for specimens from different steel grades was: C20 –  $t \cong 2,0 \text{ ms}$ ; C45 –  $t \cong 0,8 \text{ ms}$ ; 37Cr4 –  $t \cong 0,9 \text{ ms}$ ; 60Si7 –  $t \cong 0,5 \text{ ms}$ , which corresponds to the design model.

Specimens under static-dynamic loading were separated by the breaking method according to the three-point bending scheme with a preliminary static force  $F_{st} = 12 \text{ kN}$ , the value of which was determined experimentally, taking into account the recommendations.

The smoothed graphs of the change in the force parameters of the three-point bending depending on the time for specimens made of different materials under static-dynamic loading are shown in Fig. 6.



**Fig. 6. Experimental data of changes in forces at the contact of the breaker with the specimen  $F_4 = f(t) - 1$  and total reaction of supports  $F_6 = f(t) - 2$  (readings of two channels taken simultaneously) for steel specimens: a – C20; b – C45; c – 37Cr4; d – 60Si7 under static-dynamic loading**

Analysis of the experimental results (see Fig. 6) shows that the presence of preliminary static loading excludes the separation of the specimen from the supports, which confirms the adequacy of the mathematical model. Preliminary static loading of the specimen on the press-hammer increases its stiffness and ensures its initial displacement at the contact with the supports.

The maximum values of the forces  $F_4$ ,  $F_6$  under static-dynamic loading turned out to be higher in comparison with dynamic loading (Table 1), but not significantly. This is due to the presence of the static component  $F_{st}$ .

The time during which the fracture process occurs for specimens from different steel grades under static-dynamic loading corresponds to the time under dynamic loading.

Table 1

**Experimental measurements of forces  $F_4$ ,  $F_6$  under dynamic and static-dynamic loading**

Steel grade	Separation force at, $kN$			
	dynamic loading		static-dynamic loading	
	$F_4$	$F_6$	$F_4$	$F_6$
C20	32	30	33	31
C45	32	30	34	32
37Cr4	40	38	42	41
60Si7	34	32	36	34

In paper<sup>12</sup>, recommendations were developed for choosing a method for separating rolled bars into cut-to-length blanks according to the value of the values of synergistic criteria: «crack growth criterion» –  $K_{cp}$ , «brittleness criterion» –  $P_{fr}$ . The higher the values of  $K_{cp}$ ,  $P_{fr}$ , the higher the tendency of the material to brittle fracture, and the higher the quality of the blanks obtained during cold bending.

The results of calculations of synergistic fracture criteria for the materials of the samples used in the experiment are presented in Table 2.

Table 2

**Mechanical characteristics of steels and calculated values of fracture criteria**

Steel	$\sigma_{02}$ , $MPa$	$\sigma_B$ , $MPa$	$\delta$ , %	$\psi$ , %	Hard- ness $HB$	$W_c$ , $MJ/m^3$	$K_{ci}$	$K_{cp} \cdot 10^5$ , $(MJ/m^3)^2$	$P_{fr} \cdot 10^8$ , $(MJ/m^3)^3$	$M \cdot 10^3$
C20	250	420	25	55	163	309	1,2	0,58017	0,10878108	3,282
C45	360	610	16	40	197	273	0,8	0,73623	0,19878279	1,395
37Cr4	324	588	14	50	168	345	1,1	0,83739	0,20348584	2,176
60Si7	1175	1270	6	25	269	363	0,3	3,19587	2,81636126	0,174

Table 3 presents the results of calculations of the complex criteria: «crack growth» and «brittleness». These criteria are the basic information attributes. These criteria allow to classify material to next groups: «material in plastic state», «material in elastoplastic state» and «material in brittle state». Based on the analysis of obtained calculations the ranges of values of these criteria for classification of materials by mechanical properties are determined.

<sup>12</sup> Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. V. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. №119. P. 5277–5287. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08653-y>.

Table 3

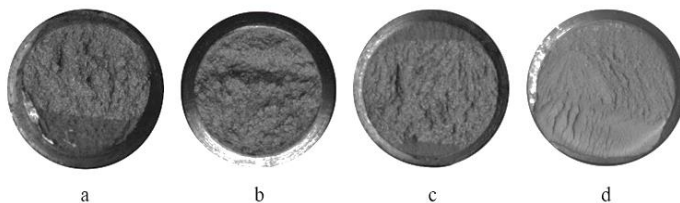
**Ranges of values of the complex criteria of «crack growth»  
and «brittleness» for groups of materials with different  
mechanical properties**

Steel group	$K_{cp}, (MJ/m^3)^2$	$P_{fr}, (MJ/m^3)^3$
«In plastic state»	$\leq 7 \cdot 10^4$	$\leq 15 \cdot 10^6$
«In elastoplastic state»	$\leq 20 \cdot 10^4$	$\leq 100 \cdot 10^6$
«In brittle state»	$> 20 \cdot 10^4$	$> 100 \cdot 10^6$

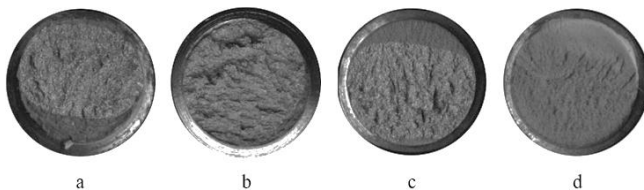
The results obtained are in good agreement with the measurements of the geometric accuracy of the specimens obtained experimentally. Photographs of workpieces from different steel grades, separated according to the three-point bending scheme under static and shock loading, are shown in Fig. 7, 8.

Measurement of geometric parameters characterizing the geometric accuracy of the separated specimens was performed by the method of macrostructural analysis by measuring the absolute and relative values of geometric distortions using a universal measuring tool and a microscope.

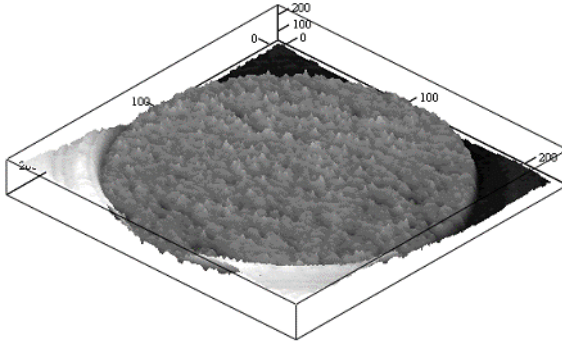
The results of measurements for the fractal dimensions of workpieces obtained by the method of separating specimens according to the three-point bending scheme under dynamic and static-dynamic loading are shown in Fig. 9, 10.



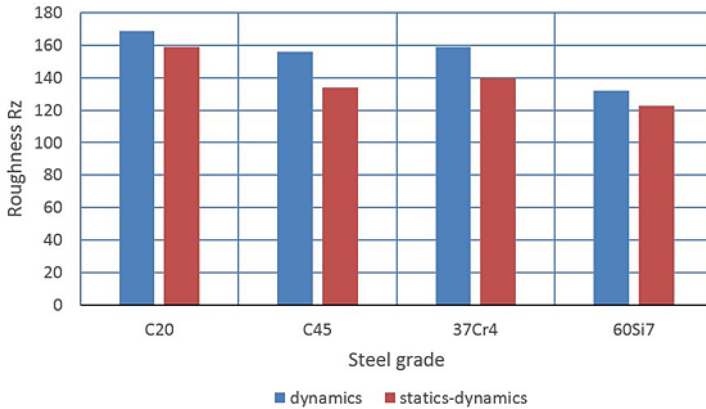
**Fig. 7. Photographs of workpieces obtained under dynamic loading  
by the method of cold bending breaking:  
a – C20; b – C45; c – 37Cr4; d – 60Si7**



**Fig. 8. Photographs of workpieces obtained under dynamic loading  
by the method of cold breaking by bending:  
a – C20; b – C45; c – 37Cr4; d – 60Si7**



**Fig. 9. Example of measuring fractal dimensions of the workpieces ends made of 60Si7 steel under static-dynamic loading**



**Fig. 10. Results of workpieces fractal dimensions measurements obtained by the method of separating specimens according to the three-point bending scheme under dynamic and static-dynamic loading**

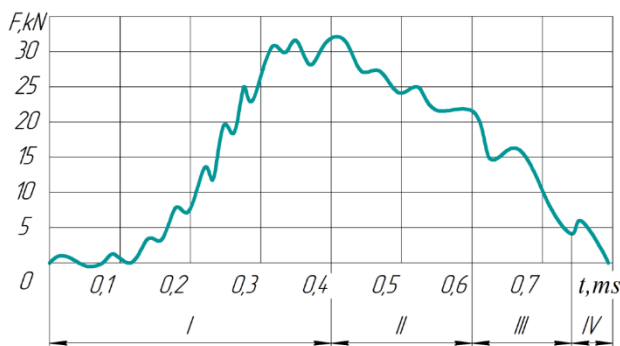
The analysis of the obtained results shows an improvement in the quality of the specimens under static-dynamic loading as compared to dynamic loading. The highest quality was observed for 60Si7 steel specimens: the fracture is brittle, the fracture surface is brushed, the crack trajectory is straight, and the specimen areas near the stress concentrator are practically not deformed. The roughness of the workpieces ends surface in the plane of separation from steels: 20, C45, 37Cr4 is decreases. The specimens of steel C45 were obtained as a result of viscoelastic fracture, the fracture surface is streaky, rough  $R_z 134$ . The specimens of steel 37Cr4 were obtained as a result of viscoelastic fracture, the fracture surface is streaky, rough  $R_z 140$ . A more

noticeable improvement in the quality of workpieces will be manifested when separating specimens of large cross sections.

The quality of workpieces depends on the efficiency of the stress concentrator applied to the rolled product in the separation plane. There are many ways to apply stress concentrators to rolled products *Ошибка! Закладка не определена.* The essence of the method lies in the fact that the energy of elastic deformation of the bed and the drive accumulated in the press during the separation of rolled products, at the moment of destruction, is spent on doing useful work – applying a stress concentrator for breaking by bending the next workpieces.

According to the received charts  $F = f(t)$  (see fig. 5, 6) for specimens from different steel grades with a sufficiently high resolution in both coordinates, the following zones can be distinguished: *I* – crack nucleation zone; *II* – ductile crack growth zone; *III* – brittle destruction zone; *IV* – viscous break zone. Besides, given the high performance characteristics of the system and the possibility of accumulating a large amount of data, it is possible to selectively consider the received signal with a duration of several milliseconds in very narrow time ranges of interest to the researcher (on the order of units and tens of microseconds). This allows to estimate the value of the crack propagation velocity correctly.

For example, for steel C45 (Fig. 11), the duration of the brittle fracture zone is approximately 0,15 ms.



**Fig. 11. Zones of crack propagation under dynamic loading of specimens from steel C45 according to the three-point bending scheme ( $F_4 = f(t)$ )**

This allows to estimate with sufficient accuracy the average velocity of a brittle crack propagation (the crack penetration trajectory was determined from the fracture of the fractured specimen (see Fig. 7)), which was approximately 80 m/s.

The duration of the brittle crack breakthrough for other steel grades was determined in a similar way, which is  $t \cong 0,1 \dots 0,8 \text{ ms}$ . Including average rates of brittle cracks propagation: 60Si7 – 120 m/s; 37Cr4 – 70 m/s; C20 – 50 m/s.

Analysis of the brittle cracks breakthrough rates values shows that they are practically the same under dynamic and static-dynamic loading and do not reach critical values, and therefore the quality of the separated workpieces is quite high.

## CONCLUSIONS

1. Combined static-dynamic loading during cold breaking by bending allows to reduce high-frequency vibrations of the «tool – specimen – support» system, and also to eliminate the violation of the specimen contact with the supports, to reduce the peak values of the forces from the side of the punch and supports.

2. The presence of a static force at the moment of impact provides a certain initial level of tensile stresses in the zone of the stress concentrator, which increases crack controllability. It is assumed that a fracture crack will always propagate in the area of tensile stresses, which improves the quality of the workpieces being separated. A more noticeable improvement in the quality of the workpieces will manifest itself when separating specimens of large cross-sections.

3. The reactive forces from the side of supports from the static force action coincide with the direction of the inertial forces of the specimen halves and additionally break the specimen. In this case, with an increase in the specimen length, the value of its separation from the supports in the initial phase of loading decreases, which has a positive effect on the quality of the obtained workpieces.

4. The magnitude of the static force required to eliminate the separation of the specimen from the supports depends on the stiffness of the contact between the head and the intermediate punch and increases with the increase in the stiffness of the contact between the head and the intermediate punch. The contact stiffness value between the head and the intermediate punch should be selected as optimal one due to the special design of the punch.

5. The obtained experimental results confirm the adequacy of the specimen separation mathematical model by the breaking method under dynamic and static-dynamic loading. It has been experimentally established that the value of the preliminary static force must be at least 40% of the force at which the specimen is failed.

6. Analysis of the values for the brittle cracks breakthrough rates shows that they are practically the same under dynamic and static-dynamic loading and are, respectively: 60Si7 – 120 m/s; C45 – 80 m/s; 37Cr4 – 70 m/s; C20 – 50 m/s. The crack velocities do not reach critical values, and therefore the quality of the separated workpieces is quite high.

7. The obtained results can be used to improve the technology of the separating rolled stock into dimensional workpieces by the method of cold breaking bending.



## SUMMARY

The aim of the work is to improve the quality of workpieces obtained by breaking rolled stock products by researching the separation process under dynamic and static-dynamic loading on a press-hammer. Combined static-dynamic loading during cold breaking by bending allows to reduce high-frequency vibrations of the “tool – specimen – support” system, to eliminate the violation of the contact of the specimen with the supports, to reduce the peak values of the forces from the side of the hatchet and supports. The static force at the moment of impact provides a certain initial level of tensile stresses in the area of the stress concentrator. This has a positive effect on the quality of the obtained workpieces. The magnitude of the static force required to exclude the separation of the specimen from the supports depends on the stiffness of the contact between the head and the intermediate punch and increases with increasing this stiffness. The obtained experimental results confirm the adequacy of the mathematical model of specimen separation by the breaking method under dynamic and static-dynamic loading. It has been experimentally established that the value of the preliminary static force must be at least 40% of the force at which the specimen is broken down. Analysis of the brittle cracks breakthrough rates values shows that they are practically the same under dynamic and static-dynamic loading and are, respectively: 60Si7 – 120 m/s; C45 – 80 m/s; 37Cr4 – 70 m/s; C20 – 50 m/s. The crack velocities do not reach critical values, and therefore the quality of the workpieces being separated is quite high. The results obtained results can be used to improve the technology of the separating rolled stock into dimensional workpieces by the method of cold breaking by bending.

Key words: breaking, bending, press-hammer, impact, dynamic loading, static-dynamic loading, rate/velocity, crack, energy, quality, rolled stock, workpiece.

## Bibliography

1. Tang B., Liu Y., Mao H. Investigation of a novel modified die design for fine-blanking process to reduce the die-roll size. *Procedia Engineering*. 2017. №207, P. 1546–1551. doi:10.1016/j.proeng.2017.10.1076.
2. Joun M. S., Jeong S. W., Park Y. T., Hong S. M. Experimental and numerical study on shearing of a rod to produce long billets for cold forging. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021. №62. P. 797–805. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.12.062.
3. Карнаух С. Г. Розробка штампів для точного відрізання зсувом. *Машинознавство*. 1998. № 3. С. 34–36.
4. Lisunets N. L. Usage of physical and mathematical simulation for improvement of the processes of metal shear cutting. *CIS Iron and Steel Review*. 2019. №17. P. 34–38.
5. Lisunets N. L. Improving the efficiency of the processes of billets manufacture from rolled metal via shift cutting based on simulation. *Chernye Metally*. 2018. №6. P. 31–35.

6. Karnaukh S. G., Markov O. E., Aliieva L. I., Kukhar V. V. Designing and researching of the equipment for cutting by breaking of rolled stock. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. №109. P. 2457–2464. doi: 10.1007/s00170-020-05824-7.

7. Zheng Q., Zhuang X., Zhao Z. State-of-the-art and future challenge in fine-blanking technology. *Production Engineering*. 2019. №13. P. 61–70.

8. Karnaukh S. G., Karnaukh D. S. Research of the influence of deformation speed on energy and power adjectives of the process of three-point cold bend breaking and on alignment integrity of raw parts. *Metallurgical and Mining Industry*. 2011. №3. P. 107–114.

9. Карнаух С. Г., Бігунов О. О., Мучник О. Є. Дослідження процесу статико-динамічного навантаження зразків за схемою триточкового холодного ламання згином на прес-молотах. *Машинознавство*. 2000. №12. С. 31–36.

10. Karnaukh S. G., Aliiev I. S. Research of process of division of grade rolling on the measured blanks by method of breaking bend at static and shock loading. *Scientific journals of Vinnytsa national agrarian university. Engineering, energy, transport*. 2021. Vol.112, №1. С. 81–87. doi: 10.37128/2520-6168-2021-1-10.

11. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. V. Research of the rolled stock separating into workpieces using breaking by bending with dynamic and static-dynamic force. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. №120. P. 2763–2776. doi: 10.1007/s00170-022-08902-0.

12. Karnaukh S. G., Markov O. E., Kukhar V. V., Shapoval A. V. Classification of steels according to their sensitivity to fracture using a synergetic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. №119. P. 5277–5287. doi: 10.1007/s00170-022-08653-y.

#### **Information about the authors:**

**Karnaukh Sergii Grygorovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Basics of Designing a Machine

Donbass State Engineering Academy

72, Akademichna Str., Kramatorsk, Donetsk region, 84313, Ukraine

**Markov Oleg Yevhenovych,**

Doctor of Technical Sciences

Professor at the Department of Manufacturing Processes Automation

Donbass State Engineering Academy

72, Akademichna Str., Kramatorsk, Donetsk region, 84313, Ukraine

## IMPLEMENTATION OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEM FOR PRODUCTION OF TMCP TREATED 10MN2VNBAL STEEL HEAVY PLATES

Kukhar V. V., Kurpe O. H., Malii K. V.

### INTRODUCTION

The quality of hot-rolled steel products depends on technological means as a complex of mechanical, environmental, surface, and other operating properties of rolled products that determine its suitability to meet certain customers' needs<sup>1</sup>. To obtain an increased level of plate steel mechanical properties, a number of effective but energy-intensive heat treatment process flows with preliminary modification of alloying elements and formation of multiphase structures<sup>2</sup> are used: ART treatment of steels with an average manganese grade, isothermal hardening of nanostructured steels with carbide-free bainite, Q&P and D&P processing. In most hot plate rolling mills, more energy-efficient thermo-mechanically controlled process (TMCP) technologies are suitable for implementation, but to obtain rolled products with increased quality indicators, the quality control system should be continuously improved<sup>3</sup>. To ensure the full functioning of the enterprise or company and its development in all process areas, from raw material supply, including supplier management and equipment maintenance, to customer (consumer) management, the quality management system is essential for implementation in accordance with the ISO 9000 and ISO 9001 requirements. For complex rolling operations at full-cycle steel-making facilities, the development of a proactive quality management system becomes especially important when developing new product types and improving existing technologies.

### 1. Literature Review

The quality management system (QMS) at steel-making enterprises has long been formed around technologies by the introduction of global certification and implementation of Total Quality Management (TQM)

---

<sup>1</sup> Sheyko S., Matiukhin A., Tsyganov V., Andreev A., Ben A., Kulabneva E. Energy power parameter effect of hot rolling on the formation of the structure and properties of low-alloy steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021.No. 6. P. 20–26.

<sup>2</sup> Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving Quality in the Process of Hot Rolling of Steel Sheets. *Applied Sciences*. 2021. Vol.14. Issue 12. P. 5451.

<sup>3</sup> Bleck W., Brühl F., Ma Y., Sasse C. Materials and Processes for the Third-generation Advanced High-strength Steels. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2019. No. 164. P. 466–474.

principles using a number of selected quality initiatives and practices<sup>4,5</sup>. The involvement of a quality system in steel-making infrastructures is formal, but not everywhere. The paper<sup>6</sup> shows that ISO 9001 is the world's most popular QMS, certifying over 1 million different companies; moreover, Europe and the Far East make up nearly 90% of all ISO 9001 certificate amounts. These are mainly infrastructure and manufacturing companies whose adherence to QMS principles contributes to global competition. There are positive experiences of TQM implementation in the industrial sectors of developed<sup>7</sup> and developing countries<sup>8</sup>. Special expert evaluations and questionnaires were developed to identify components (factors) affecting the efficiency and sustainability of enterprises. The study<sup>9</sup> proposes a model confirming that the TQM practices have a positive relation with sustainability and organisational performance and showed that leadership, continuous improvement, customer satisfaction, training and education, and customer relations have the greatest influence on organisational effectiveness. To develop the TQM strategy, the authors<sup>10</sup> suggest using a qualitative research technique to collect secondary data from empirical studies and literature reviews. This work<sup>11</sup> is presented as the implementation guide for QMS and follows the four pillars of ISO 9001: quality management principles, process approach, risk-based thinking, and Plan-Do-Check-Act (PDCA, or Deming) cycle.

---

<sup>4</sup> Kukhar V.V., Kurpe O.H., Prysiashnyi A.H., Khliestova O.A., Burko V.A., Balalayeva E.Y., Yelistratova N.Y. Improving of preventive management for flat rolling products quality indices. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1037. P. 12024.

<sup>5</sup> Bajaj S., Garg R., Sethi M. Identification of TQM Practices for Successful Implementation of TQM in Steel Industries: A Review and Analysis. *International Journal of Engineering and Management Research*. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 208–214.

<sup>6</sup> Tervonen P., Pakkala N., Haapasalo H. *Development of TQM in Steel Manufacturers' Production*. IBIMA Business Review. 2009. Vol. 1. P. 14–21.

<sup>7</sup> Priede J. Implementation of Quality Management System ISO 9001 in the World and Its Strategic Necessity. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. P. 1466–1475.

<sup>8</sup> Petcharit A., Sornsarut P., Pimdee P. An Analysis of Total Quality Management (TQM) within the Thai Auto Parts Sector. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 16. Issue 2. P. 131.

<sup>9</sup> Safar H., Bielova O. Implementation of Total Quality Management Components in Libyan Iron & Steel Company “LISCO”. *Economics, Finance and Management Review*. 2021. Vol. 2. Issue 6. P. 81–91.

<sup>10</sup> Wassan A., Memon M. S., Mari S. I., Kalwar M. Impact of Total Quality Management (TQM) practices on Sustainability and Organisational Performance. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*. 2022. Vol. 3. P. 93–102.

<sup>11</sup> Bisho A. H. A.I., Sam M. F. B. M. Total Quality Management Integrated Strategy: Its Implication to Organizational Success. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2022. Vol. 4. Issue 3. P. 371–378.

The combination of the ISO 9001 quality system with the tools of the Lean production system<sup>12</sup> shows effective results, ensuring long-term competitiveness with lower losses while manufacturing in exact accordance with consumer requests. A proactive quality management system should be formalised according to the SMART principles: Specific, Measurable, Attainable, Relevant, and Time-bound<sup>13</sup>. In rolling production, such integrated approaches are still being developed, and the following analysis tools, which are widely used in the Lean system and statistical processing methods<sup>14</sup>, can be used, among other things, to monitor the status and continuously improve the quality system: process mapping, benchmarking, the Ishikawa (fishbone) diagram, and the Pareto principle.

Articles<sup>15,16</sup> show that an effective formalisation under ISO 9001:2015 is risk-based thinking, which allows us to identify factors causing deviations in the rolling technology and quality indicators from the planned results. The process of thermo-mechanical processing of rolled products is highly sensitive to the process stability, making the risk-based approach assessment reasonable. Data on already manufactured products and the results of their quality control (at the enterprise and following customer feedback) is the basis for creating control criteria. Corrective actions are integrated into QMS processes as an element of Deming cycle (PDCA), which is successfully implemented in relation to TMCP rolling of low-carbon, low-alloy steel heavy

---

<sup>12</sup> Farinha L. Guidelines for the Implementation of a Quality Management System in Industrial Companies. *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*. 2016. Vol. 50. P. 195–201.

<sup>13</sup> Ratter E., Nader S. The Use of Lean Management Tools in Production Companies with Implemented Total Quality Management (TQM). *European Research Studies Journal*. 2022. Vol. XXV. Issue 3. P. 357–368.

<sup>14</sup> Bashynska I. Realities of Ukrainian industrial enterprises on the way to smartization. *Economics Finances Law*. 2019. Vol. 12. Issue 2. P. 34–37.

<sup>15</sup> Harel Z., Silver S. A., McQuillan R. F., Weizman A. V., Thomas A., Chertow G. M., Nesrallah G., Chan C. T., Bell C. M. How to Diagnose Solutions to a Quality of Care Problem. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*. 2016. Vol. 11. Issue 5. P. 901–907.

<sup>16</sup> Syreyshchikova N., Pimenov D., Yaroslavova E., Gupta M., Aamir M., Giasin K. Managing Risks in the Improved Model of Rolling Mill Loading: A Case Study. *Journal of Risk and Financial Management*. 2021. Vol. 14. Issue 8. P. 359.

plates<sup>17</sup>. It follows<sup>18,19,20</sup> from papers that each production builds its quality control system, which takes into account the specifics of its structure and management methods. At the same time, proactive quality management systems<sup>21,22</sup> are widely used, including methods of controlling technological parameters<sup>23,24</sup>, testing quality indicators<sup>25,26</sup>, and forecasting based on mathematical models (e.g., statistical<sup>27,28</sup> or neural network<sup>29,30</sup>). Thus, in

---

<sup>17</sup> Kukhar V.V., Kurpe O.H., Prysiashnyi A.H., Khliestova O.A., Burko V.A., Balalayeva E.Y., Yelistratova N.Y. Improving of preventive management for flat rolling products quality indices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1037. P.12024.

<sup>18</sup> Dewi D., Bastori I., Yuliyanto A., Stankevica K., Soetrisnanto A. Manufacturing Risk Identification in the Steel Industry. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 190. Issue 2. 00006

<sup>19</sup> Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving Quality in the Process of Hot Rolling of Steel Sheets. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 12. P. 5451.

<sup>20</sup> Bashynska I. Realities of Ukrainian industrial enterprises on the way to smartization. *Economics Finances Law*. 2019. Vol. 12. Issue 2. P. 34–37.

<sup>21</sup> Kukhar V.V., Kurpe O.H., Prysiashnyi A.H., Khliestova O.A., Burko V.A., Balalayeva E.Y., Yelistratova N.Y. Improving of preventive management for flat rolling products quality indices. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1037. P.12024.

<sup>22</sup> Backman J., Kyllönen V., Helaakoski H. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes. *Current State and Future Methods. IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. Issue 13. P. 1174–1179.

<sup>23</sup> Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prysiashnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 63–71.

<sup>24</sup> Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25<sup>th</sup> IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. 2020. P. 510–513.

<sup>25</sup> Hu J., Du L.-X., Xie H., Gao X.-H., Misra R.D.K. Microstructure and mechanical properties of TMCP heavy plate microalloyed steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 607. P. 122-131.

<sup>26</sup> Mazur I., Koinov T. Quality Control system for a hot-rolled metal surface. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. P. 287–296.

<sup>27</sup> Prysiashnyi A., Kukhar V., Hornostai V., Kudinova E., Korenko M., Anishchenko O. Mathematical Models for Forecasting of 10Mn2VNb Steel Heavy Plates Mechanical Properties. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1045. P. 237–245.

<sup>28</sup> Efremenko V., Zotov D., Zurnadzhy V., Kussa R., Savenko V., Sagiroy R., Bocharova O., Efremenko A. Computer modelling-based selection of accelerated cooling parameters for advanced high-strength structural steel. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1037. P. 012030.

<sup>29</sup> Xing S., Ju J., Xing J. Research on hot-rolling steel products quality control based on BP neural network inverse model. *Neural Computing and Applications*. 2019. No. 31. P. 1577–1584.

<sup>30</sup> Xu Z.-W., Liu X.-M., Zhang K. Mechanical Properties Prediction for Hot Rolled Alloy Steel Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2019. No. 7. P. 47068–47078.

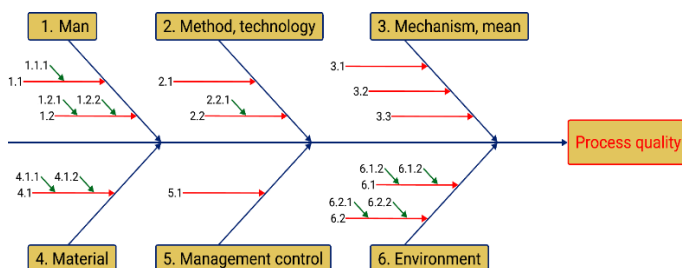
order to control the production process and ensure the predicted quality of thermo-mechanically processed rolled products, it is necessary to develop a proactive quality management system to establish and control the relevant technological factors, which is the objective of this study.

**The study aims** to improve the structure of quality management methods as applied to the plate manufacturing processes by thermo-mechanically controlled rolling to upgrade the mechanical properties of 10Mn2VNbAl steel products.

## 2. Methodology of Research

**Establishment of indicators.** Technological indicators affecting quality parameters (other indicators can also be determined, if necessary) that need to be monitored can be established in the following ways:

- establishing already known indicators stated in the process flow documentation, etc.;
- setting indicators using the Ishikawa diagram, Fig. 1.



**Fig. 1. General view of the Ishikawa diagram**

**1.1, 1.1.1, 1.2, 1.2.1, 1.2.2** – levels and sub-levels of indicators through which the ‘Man’ category (compliance with the production method, experience, qualification) affects the quality parameters;

**2.1, 2.2, 2.2.1** – levels and sub-levels of indicators through which the ‘Methods and Technology’ category (production method, level of technology used, control methods) affects the quality parameters;

**3.1, 3.2, 3.3** – levels of indicators through which the ‘Mean, Mechanism’ category (equipment, devices for control, tests, research) affects the quality parameters;

**4.1, 4.1.1, 4.1.2** – levels and sub-levels of indicators through which the ‘Material’ category (used material, properties, anisotropy) affects the quality parameters;

**5.1** – the level of indicators through which the ‘Management Control’ category (means of control and timely correction of technological parameter deviations) affects the quality parameters;

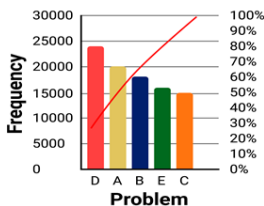
**6.1, 6.1.1, 6.1.2, 6.2, 6.2.1, 6.2.2** – levels and sub-levels of indicators through which the ‘Environment’ category (conditions under which the production process and tests are carried out) affects the quality parameters

Indicators can be established for a set of quality parameters in general or for individual parameters/groups of quality parameters. Additionally, benchmarking results on similar production facilities can be used for establishing indicators if such data is available. The list of indicators can be endless. Therefore, in some cases, controlling only the significant indicators is possible and necessary. Determining a list of significant indicators affecting product quality is possible using the Pareto method, Fig. 2. To determine significance, it is definitely necessary to have an array of factors.

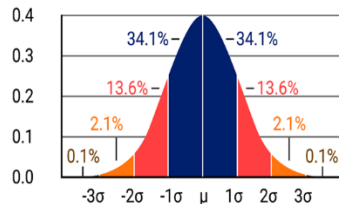
**Establishment of indicator values.** The values of technological indicators can be established directly on the basis of: an analysis of manufacturing similar products, statistical processing of available data, scientific research, literature, and other technological or statistical methods.

**Statistical data accumulation.** In the production of rolled products, it is necessary to monitor the values of all established indicators and store information that will be the basis for processing and improving product quality in the future. The established technological or other indicators should be combined with product quality parameters using a traceability system. A traceability system is a mandatory requirement for modern production, without which tracking and quality improvement are impossible.

**Processing of accumulated information.** Processing is carried out as a multivariate analysis. Each of the quality parameters should be analysed separately or in a group with parameters of a similar level. For example, a group may include all or some parameters of mechanical properties, some parameters of roll geometry, and others. The first step of the analysis is to build distribution diagrams for each of the quality parameters with a limit set according to the  $3\sigma$  or  $6\sigma$  rules, depending on the process, Fig. 3.



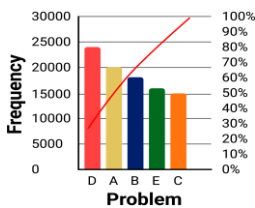
**Fig. 2. General view of the Pareto chart**



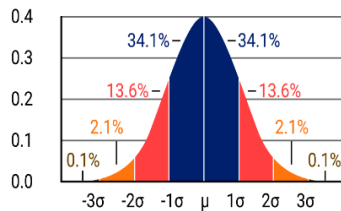
**Fig. 3. General view of the normal distribution diagram**



It should be borne in mind that the limits set should be consistent with or stricter than those stipulated in the relevant product standards or other regulatory documents. That is, if, according to a distribution, the yield stress of rolled steel is 235 MPa with a standard deviation of  $\pm 10$  MPa, and the limit according to the regulatory document is 210–255 MPa, then according to the  $3\sigma$  rule, the yield stress distribution is 205–265 MPa. In this case, the set limit should not exceed the limits of 210–255 MPa according to the regulatory document.



**Fig. 2. General view of the Pareto chart**



**Fig. 3. General view of the normal distribution diagram**

If the process is not stable enough, limits can be set at the level of regulatory requirements. The gradual narrowing of limits will further improve the stability of the production process. Only those quality parameter data that meet the set limit are used for further processing of the array. Next, for each technological indicator that affects the quality parameter under consideration, it is necessary to build distribution diagrams and set limits that ensure the desired quality result. Separate setting of limits for interdependent technological parameters should be avoided, as well as setting different limits for the same parameter that affects different quality indicators. To set limits, including those for interdependent parameters, it is recommended to use comprehensive statistical models based on the data arrays obtained. Such models can be conveniently built into specialised software applications or the Microsoft Excel analysis package.

**Setting markers and boundaries.** Coloured markers, which help visually assess a process' state, have been recently widely used. When setting limits of technological indicators/parameters, coloured markers can be applied as follows, Fig. 4:

- a red marker is set when the technological indicator/parameter deviates from the limits that ensure obtaining a quality parameter in accordance with the standard;
- a yellow marker is set when the technological indicator/parameter deviates from the limits that ensure the increased requirements set within the

limits of the quality system management while the parameter is still within the limits of compliance with the standard;

– a green marker is set when the technological parameter meets the limits of the established (increased) requirements.

Quality index / technological indicator	Levels of the process				
	process failure	needs attention	stable	needs attention	process failure
Yield stress	<210	210-214	215-250	251-255	>255
Finishing rolling temperature	<800	800-809	810-830	831-840	>840

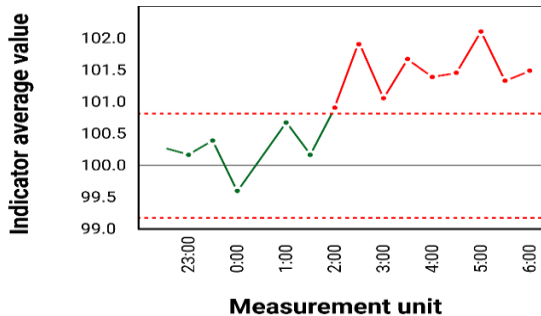
**Fig. 4. An example of using colour markers to assess the rolling process state**

Depending on the current state of the quality system and technology, as well as at the initial stages of technology development, only red and green markers can be set. It should be noted that this approach not only helps to stabilise the technological process and improve product quality but also provides an opportunity to reduce production costs within the framework of a combination of ISO and Lean systems by applying restrictions on extremely high levels of quality parameters. For example, stable maintenance of the mechanical properties of rolled products at the average level of requirements allows us to save microalloying elements.

**Tracking the Shewhart chart result.** Tracking the result and monitoring compliance with the established limits on technological parameters should be carried out using any convenient methods available at the enterprise. This can be direct control by a quality control officer at the place of parameter locking, using a visualisation (control) system of technological parameters, or using an automatic process control system. One of the most well-known ways to analyse the results of tracking process stability is through Shewhart control charts<sup>31</sup>, which are a graph of changes in a sample of parameters, usually the mean value and standard deviation, which is calculated while accumulating data, Fig. 5.

---

<sup>31</sup> Ratter E., Nader S. The Use of Lean Management Tools in Production Companies with Implemented Total Quality Management (TQM). *European Research Studies Journal*. 2022. Vol. XXV. Issue 3. P. 357–368.



**Fig. 5. General view of the Shewhart control chart**

If the permissible level of deviation is exceeded, or if the indicator falls into the yellow or red field, the process staff ensures the indicator enters the required limits/green field. A product unit, batch, or other product manufactured outside the green field must be tracked separately.

**Decision-making on products manufactured with deviations from the standards.** Obtaining information on deviations allows us to manage the further fate of such products in accordance with the requirements of Clauses 8.6 and 8.7 of ISO 9001<sup>32</sup>. Batch products, every single unit of which has indicators within the green marker during the production, are considered conforming. Batch products, some units of which have indicators within the yellow marker during the production, are subject to additional quality control. Products with indicators within the yellow marker are subject to additional control/testing. Products with yellow markers are considered conforming only after confirmation by the results of additional control. This method can be used up to the point of individual product inspection, unless the customer objects.

Batch products, some units of which have indicators within the red marker during production, unless agreed with the customer, are considered non-conforming and are transferred to lower quality or rejected. A batch of rolled products may contain a set of units with a combination of any markers, if agreed with the customer, or be separated into different batches according to the markers.

When manufacturing new products, the basic limits of technological parameters may be the parameters of analogue products, if any. In general, the proposed method is applicable to products that have passed the assimilation stage and are produced on an industrial scale. The proposed principle can be applied to partner companies that provide manufacturer's products with additional added

<sup>32</sup> Bajaj S., Garg R., Sethi M. Identification of TQM Practices for Successful Implementation of TQM in Steel Industries: A Review and Analysis. *International Journal of Engineering and Management Research*. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 208-214.

value (e.g., additional surface treatment of rolled products) if the final product is sold by the manufacturing company or its affiliated companies or to process product quality data based on data provided by customers.

**Methodology improvement.** Thus, the quality management methodology, which involves setting and establishing the values of technological indicators affecting product quality, their control, accumulation, processing, and improvement mechanisms, as a separate element of the quality system, is subject to the PDCA cycle and confirms the integrity of the quality system in general and its individual elements. The presentation of the proposed methodology in the form of the PDCA cycle is presented in the paper<sup>33</sup>.

The update period of the PDCA cycle may vary for different products. The data update period can be static or dynamic. A stationary, or ‘scheduled’, period is a time-based update frequency for a specific product type, depending on the production volume, for example, every 50 thousand tons, or depending on the production time, for example, every month or every quarter.

The dynamic, or ‘operational’, update period is applied for a specific product type or range and can be divided according to the following principles:

- cycle update when a set limit for the non-compliant products is exceeded, e.g. 3%;
- cycle update when the set limit for the number of indicators falling within the yellow and/or red markers is exceeded;
- cycle update when the set limit by the number of products requiring additional control is exceeded, for example, by more than 10%.

Cycle performance is closely related to the technology, as it is continuously monitored and analysed, and technology is adjusted to improve quality. The technological information used and its processing results are part of an enterprise’s general ‘Knowledge Base’.

### 3. Result of Research

**Application example.** Let us consider the application of the developed methodology to establish the current level of quality and directions for improving such indicators as yield stress (YS), ultimate strength (US), and percentage elongation (E%) in the production of 14 mm thick plates using 10Mn2VNbAl steel produced by thermo-mechanical rolling with accelerated cooling on the 3600 mill. The indicators affecting the quality parameters, such as yield stress, ultimate strength, and percentage elongation, were taken from the plant’s technological documentation. The indicators include the chemical

---

<sup>33</sup> Sheyko S., Matiukhin A., Tsyganov V., Andreev A., Ben A., Kulabneva E. Energy power parameter effect of hot rolling on the formation of the structure and properties of low-alloy steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6. P. 20–26.

composition of steel with the following elements affecting the mechanical properties (C, Mn, Nb, V, Mo, Cr, Ni, Cu) and technological parameters: rolling start temperature in the roughing stand (TRSr), the temperature of the beginning of the second rolling stage in the roughing stand, which is caused by the onset of recrystallisation inhibition (TIR), the temperature at the rolling start and finish in the finishing stand (TRS, TRF), the metal temperature at the accelerated cooling start and finish (TACS, TACF).

To identify indicators affecting the quality parameters under study, we will build the Pareto chart for each of the parameters from the entire specified list of indicators, Figs. 6–8.

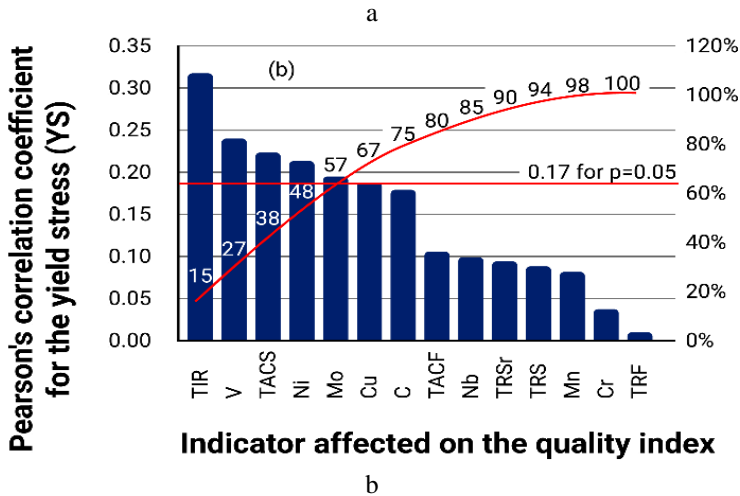
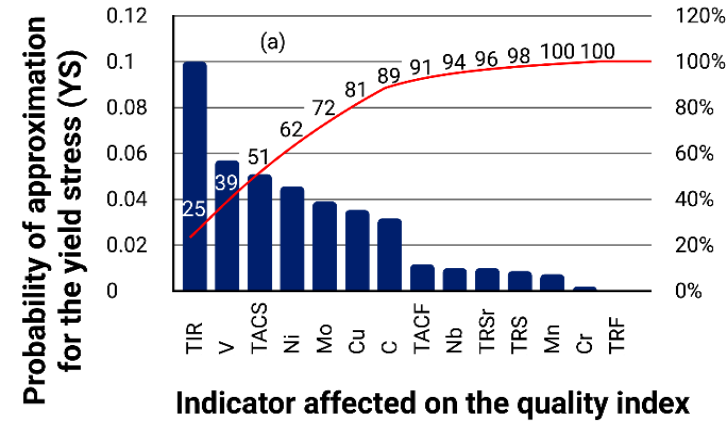
The basis for building Pareto charts is the value of the approximation probability  $R^2$  and the value of the Pearson correlation coefficient (modulo), which are obtained when determining the correlation between each indicator and the quality indicator. For the array used in the calculations, the critical value of the Pearson correlation is 0.17 (significance level 0.05). Indicators with the Pearson correlation coefficient to the respective quality parameter less than 0.17 are insignificant.

Indicators that are significant according to the results of statistical data processing are listed in Table 1. Actions on quality improvement processes are developed only for significant indicators.

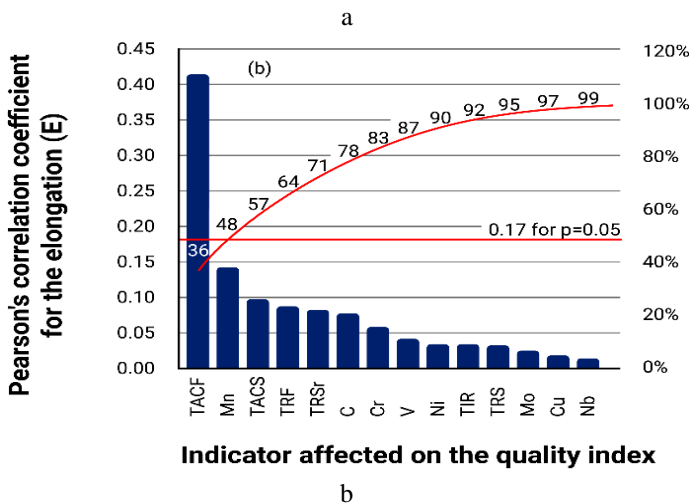
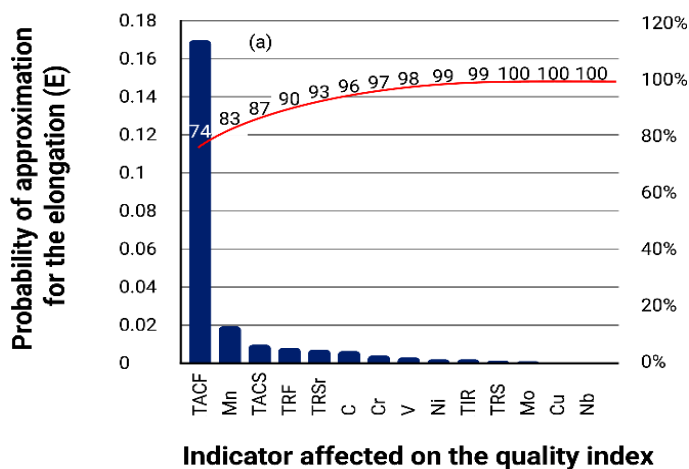
Table 1

**Significant indicators in determining the quality parameter regarding the production process of thermo-mechanically treated 10Mn2VNbAl steel**

Indicator	Pearson correlation values for quality parameters		
	YS	US	E%
TIR	0.316	0.379	-
V	0.236	0.252	-
TACS	-0.224	-0.334	-
Ni	-0.213	-0.219	-
Mo	-0.196	-	-
Cu	-0.188	-0.202	-
C	0.178	0.246	-
TRF	-	-0.241	0.412

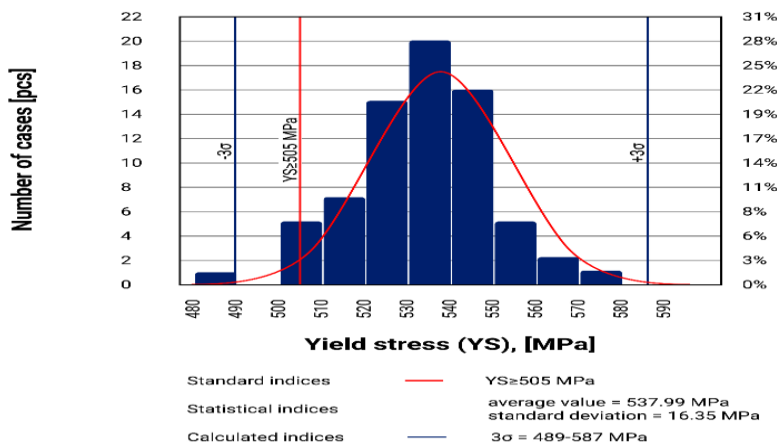


**Fig. 6. Distribution diagrams of the approximation probability (a) and the Pearson correlation coefficient (b) according to the indicators affecting the yield stress of rolled products made of thermo-mechanically treated 10Mn2VNbAl steel**

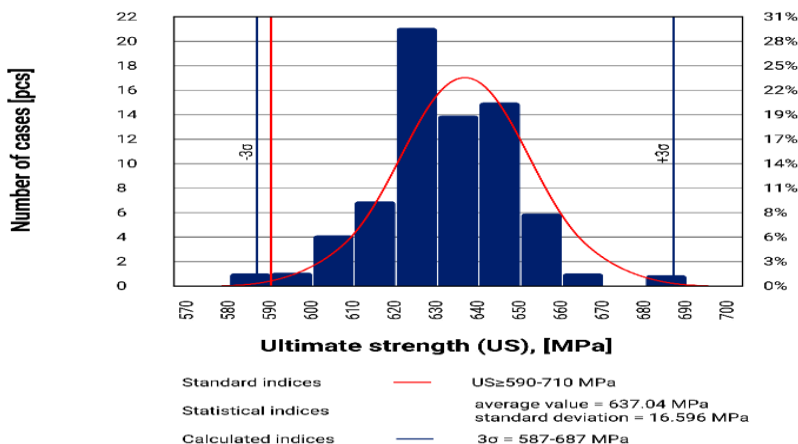


**Fig. 8. Distribution diagram of the approximation probability (a) and the Pearson correlation coefficient (b) according to the indicators affecting the percentage elongation of rolled products made of thermo-mechanically treated 10Mn2VNbAl steel**

Insignificant indicators remain at the level set by the technology. Let us build distribution diagrams by quality parameters to determine the current state of the technology for the production of 14 mm thick rolled products using 10Mn2VNbAl steel on 3600 mill, Fig. 9–11.



**Fig. 9. Yield stress distribution for 14 mm thick rolled products made of 10Mn2VNbAl steel**



**Fig. 10. Ultimate strength distribution for 14 mm thick rolled 10Mn2VNbAl steel**

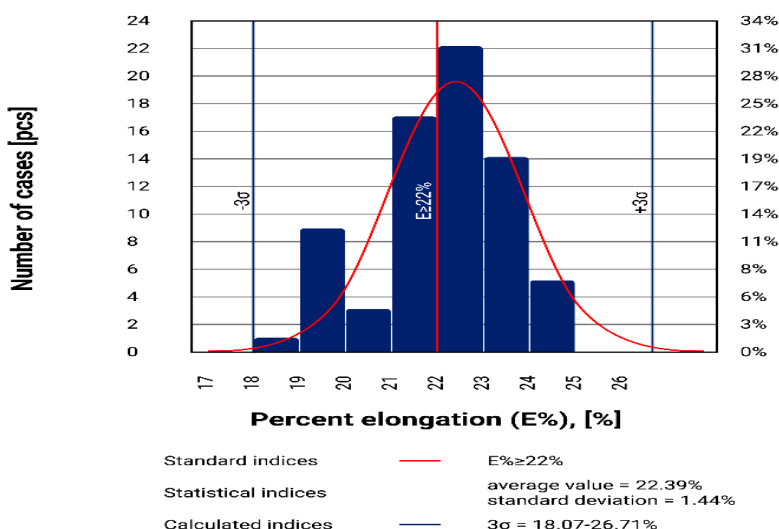
According to the distribution diagrams (see Figs. 9–11), we have the following quality status of the rolled products under study:

- the yield stress distribution has cases of below-standard and borderline with minimum standard requirements. The overall distribution is shifted to the lower level of requirements;
- the ultimate strength distribution also has cases of below-standard requirements;



– the percentage elongation distribution has many cases of below-standard requirements. The percentage elongation distribution indicates the instability of the technological process in obtaining this quality parameter.

To stabilise the technological process and improve product quality according to the parameters under study, let us set the following restrictions, Table. 2. In order to obtain the required level of technology indicators according to the set quality parameter limits, we will use filters to leave only those data in the data array under study that correspond to a stable or green level of the process and set their limits, Table 3.



**Fig. 11. Percentage elongation distribution for 14 mm thick rolled 10Mn2VNbAl steel**

Table 2

**Setting limits on quality indicators**

Quality parameter/ technological indicator	Process levels				
	process non-conformances	attention required	stable	attention required	process non-conformances
Yield stress, MPa	<505	505–510	511–570	571–580	-
Ultimate strength, MPa	<590	590–600	600–660	661–710	>710
Percentage elongation, %	<22	22–22.5	22.5–25	25–26	-

Table 3

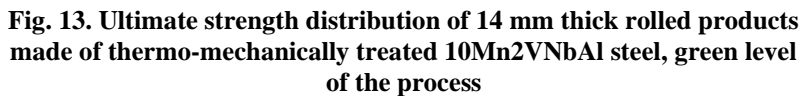
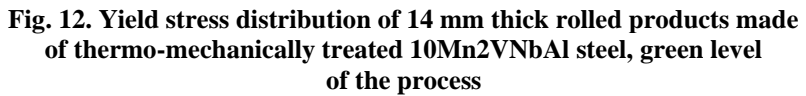
**Set limits of indicators and corresponding quality parameters**

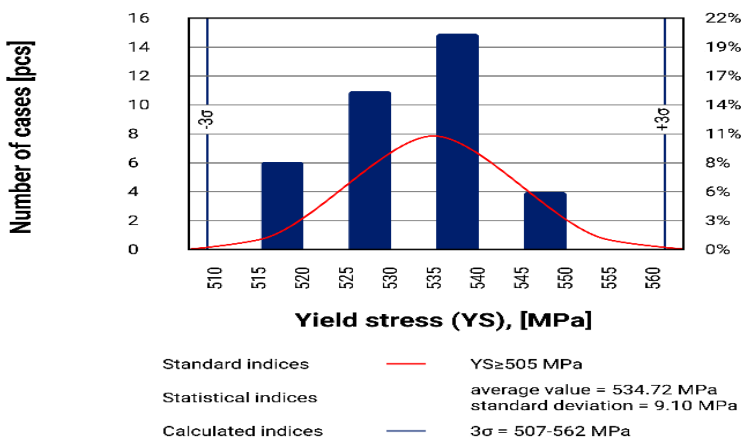
Quality parameter/ technological indicator	Process levels				
	process non-conformances	attention required	stable	attention required	process non-conformances
Yield stress, MPa	<505	505–510	511–570	571–580	
Ultimate strength, MPa	<590	590–600	600–660	661–710	>710
Percentage elongation, %	<22	22–22.4	22.5–25	25.1–26	
TIR	<876	876–908	909–1008		>1008
V	<0.055	0.056–0.059	0.06–0.08		>0.08
TACS	<717	718–720	721–737		>737
Ni			0–0.29		>0.29
Mo			0–0.07		>0.07
Cu			0–0.28		>0.28
C			0.08–0.11		>0.11
TRF	<541	542–595	596–640		>640

Filtering should begin with the most unstable parameter, which is the percentage elongation in our case. Because the list of significant indicators overlaps between quality parameters, they will be the same for all three parameters. When setting the yellow and red levels, it is necessary to consider the Pearson correlation's negative or positive value, see Table 1. Boundaries of the yellow level for the indicators are the data that meet the limits of the regulatory requirements for the quality parameters.

Also, the quality of the initially developed technological process plays an important role in setting process levels when using this method. In this case, the plant developed a false technology of thermo-mechanical rolling with accelerated cooling, which does not allow obtaining the required mechanical properties by cooling, which is evident from the negative correlations of cooling parameters.

The required properties are achieved mainly through the rolling process parameters. The advantage of the proposed method is the additional possibility of detecting errors in the developed technologies. After establishing the required levels of technological indicators to obtain stable quality parameters, we have the following distribution, Figs. 12–14.





**Fig. 14. Percent elongation (E%) distribution of 14 mm thick rolled products made of thermo-mechanically treated 10Mn2VNbAl steel, green level of the process**

Thus, the green level of the process ensured that mechanical properties were obtained within the regulatory requirements, while decreasing the standard deviation of yield stress, ultimate strength, and percentage elongation by 44%, 31%, and 46%, respectively, indicating an increase in the stability of the technology and the results obtained. The distribution of percentage elongation is not normal, but after the appropriate changes are introduced in the technology, its results should stabilise.

Therefore, within the framework of proactive quality management, a methodology for establishing and identifying the values of technological indicators affecting product quality, their control, accumulation, processing, and improvement mechanisms has been proposed and formalised for the first time. It uses the Pareto principle,  $3\sigma$ , and the Pearson criterion and aims to continuously improve the quality of technological processes and products.

## CONCLUSIONS

Based on the analysis, it has been found that additional requirements for rolled products exceed the values established by regulatory documents and need to be taken into account when developing technologies. It has been proved that based on the relationships between the technological parameters of rolled products and the mechanical properties of the finished TMCP rolled steel established using a set of statistical data processing methods, which are incorporated into the quality management methodology, it is possible to

improve the stability of rolling processes. The verification of the proposed methodology showed a reduction in the standard deviation of yield stress, ultimate strength, and percentage elongation by 44%, 31%, and 46%, respectively, from the primary data obtained during the rolling of 10Mn2VNbAl steel on a heavy plate mill 3600, which indicates the possibility of increasing the stability of the thermo-mechanical rolling process.

## **SUMMARY**

The goal of the work was to formalize and implement in the conditions of a heavy plate rolling mill shop the quality management methodology for 10Mn2VNbAl steel flat products produced by a thermomechanical controlled process (TMCP) rolling with a predicted increasing of mechanical properties indices. It is shown that the quality management system is relevant to be implemented in all process areas, from the supply of raw materials to the processes of working with consumers of products, in order to operate and achieve the enterprise development. On the basis of the analysis, it has been established those additional requirements for quality indices of rolled products exceed the values established by normative documents, which should be taken into account when developing technologies. The proposed methodology includes the use of Ishikawa's approaches to establish factors affecting quality indicators, processing of statistical information with the construction of Pareto charts and determination of compliance of the distribution of indicator values with the normal law. Designation for stability of the process and indicators levels performed by the method of coloured markers with tracking of results (by Shewhart charts, as an example). Decision-making on technology improvement with control of influencing factors of the thermomechanical rolling process, as a separate element of the quality system, is subject to the Deming cycle (PDCA). The testing of the proposed methodology showed decreases in the standard deviation of yield strength, tensile strength and percent elongation by 44%, 31% and 46% respectively, regard to the primary data obtained when rolling 10Mn2VNbAl steel at heavy plate mill 3600.

## **Bibliography**

1. Sheyko S., Matiukhin A., Tsyganov V., Andreev A., Ben A., Kulabneva E. Energy power parameter effect of hot rolling on the formation of the structure and properties of low-alloy steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6. P. 20–26.

2. Markulik S., Nagyova A., Turisova R., Villinsky T. Improving Quality in the Process of Hot Rolling of Steel Sheets. *Applied Sciences*. 2021. Vol.11. Issue 12. P. 5451.
3. Bleck W., Brühl F., Ma Y., Sasse C. Materials and Processes for the Third-generation Advanced High-strength Steels. *Berg Huetttenmaenn Monatsh*. 2019. Vol. 164. P. 466–474.
4. Kukhar V.V., Kurpe O.H., Prysiashnyi A.H., Khliestova O.A., Burko V.A., Balalayeva E.Y., Yelistratova N.Y. Improving of preventive management for flat rolling products quality indices. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1037. P. 12024.
5. Bajaj S., Garg R., Sethi M. Identification of TQM Practices for Successful Implementation of TQM in Steel Industries: A Review and Analysis. *International Journal of Engineering and Management Research*. 2016. Vol. 6. Issue 3. P. 208-214.
6. Tervonen P., Pahkala N., Haapasalo H. Development of TQM in Steel Manufacturers' Production. *IBIMA Business Review*. 2009. Vol. 1. P. 14–21.
7. Priede J. Implementation of Quality Management System ISO 9001 in the World and Its Strategic Necessity. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*. 2012. P. 1466–1475.
8. Petcharit A., Sornsaruht P., Pimdee P. An Analysis of Total Quality Management (TQM) within the Thai Auto Parts Sector. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 16. Issue 2. P. 131.
9. Safar H., Bielova O. Implementation of Total Quality Management Components in Libyan Iron & Steel Company “LISCO”. *Economics, Finance and Management Review*. 2021. Vol. 2. Issue 6. P. 81–91.
10. Wassan A., Memon M. S., Mari S. I., Kalwar M. Impact of Total Quality Management (TQM) practices on Sustainability and Organisational Performance. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*. 2022. Vol. 3. P. 93–102.
11. Bisho A. H. A.I., Sam M. F. B. M. Total Quality Management Integrated Strategy: Its Implication to Organizational Success. *Proceedings on Engineering Sciences*. 2022. Vol. 4. Issue. 3. P. 371–378.
12. Farinha L. Guidelines for the Implementation of a Quality Management System in Industrial Companies. *The Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mechatronics*. 2016. Vol. 50. P. 195–201.
13. Ratter E., Nader S. The Use of Lean Management Tools in Production Companies with Implemented Total Quality Management (TQM). *European Research Studies Journal*. 2022. Vol. XXV. Issue 3. P. 357–368.

14. Bashynska I. Realities of Ukrainian industrial enterprises on the way to smartization. *Economics Finances Law*. 2019. Vol. 12. Issue 2. P. 34–37.
15. Harel Z., Silver S. A., McQuillan R. F., Weizman A. V., Thomas A., Chertow G. M., Nesrallah G., Chan C. T., Bell C. M. How to Diagnose Solutions to a Quality of Care Problem. *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*. 2016. Vol. 11. Issue 5. P. 901–907.
16. Syreyshchikova N., Pimenov D., Yaroslavova E., Gupta M., Aamir M., Giasin K. Managing Risks in the Improved Model of Rolling Mill Loading: A Case Study. *Journal of Risk and Financial Management*. 2021. Vol. 14. Issue 8. P. 359.
17. Dewi D., Bastori I., Yuliyanto A., Stankevica K., Soetrisnanto A. Manufacturing Risk Identification in the Steel Industry. *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 190. Issue 2. 00006
18. Backman J., Kyllönen V., Helaakoski H. Methods and Tools of Improving Steel Manufacturing Processes. *Current State and Future Methods. IFAC-PapersOnLine*. 2019. Vol. 52. Issue 13. P. 1174–1179.
19. Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Prysiashnyi A. Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700. *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 291. P. 63–71.
20. Kurpe O., Kukhar V., Puzyr R., Burko V., Balalayeva E., Klimov E. Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill. *Proceeding of the 25<sup>th</sup> IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. 2020. P. 510–513.
21. Hu J., Du L.-X., Xie H., Gao X.-H., Misra R.D.K. Microstructure and mechanical properties of TMCP heavy plate microalloyed steel. *Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 607. P.122–131.
22. Mazur I., Koinov T. Quality Control system for a hot-rolled metal surface. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 10. Issue 37. P. 287–296.
23. Prysiashnyi A., Kukhar V., Hornostai V., Kudinova E., Korenko M., Anishchenko O. Mathematical Models for Forecasting of 10Mn2VNb Steel Heavy Plates Mechanical Properties. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1045. P. 237–245.
24. Junpradub C., Asawarungsaengkul K. Mathematical Modeling to Predict the Mechanical Properties of Hot Rolled Steel Sheets. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Bangkok. 2019. P. 2636–2644.
25. Efremenko V., Zotov D., Zurnadzhly V., Kussa R., Savenko V., Sagirov R., Bocharova O., Efremenko A. Computer modelling-based

selection of accelerated cooling parameters for advanced high-strength structural steel. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 1037. 012030.

26. Xing S., Ju J., Xing J. Research on hot-rolling steel products quality control based on BP neural network inverse model. *Neural Computing and Applications*. 2019. Vol. 31. P. 1577–1584.

27. Xu Z.-W., Liu X.-M., Zhang K. Mechanical Properties Prediction for Hot Rolled Alloy Steel Using Convolutional Neural Network. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 47068–47078.

**Information about the authors:**

**Kukhar Volodymyr Valentynovych,**

Doctor of Technical Sciences, Professor,

Vice-Rector for R&D Work,

Professor at the Department of Metallurgy, Materials Science and Production

Organization

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Kurpe Oleksandr Hennadiyovych,**

Doctor of Technical Sciences,

Head of the Technological Group Directorate

of Flat Rolled Products Programs

«METINVEST SICHSTEEL» LLC («METINVEST ENGINEERING» LLC),

74, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Malii Khrystyna Vasylivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Head of the R&D Department,

Associate Professor at the Department of Metallurgy, Materials Science and

Production Organization

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine



## СИСТЕМА МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ ФУТЕРОВКИ ЧАВУНОВОЗНИХ КОВШІВ

Левицька Т. О., Дубовкіна М. Ю.

### ВСТУП

Гірничо-металургійний комплекс України за наявними потужностями посідає п'яте місце в світі після Японії, США, Китаю і Росії і відіграє провідну роль в структурі економіки України. Чорна металургія входить в п'ятірку пріоритетних напрямків розвитку держави і розглядається як базова галузь, яка повинна забезпечити виконання найважливіших ринкових перетворень.<sup>1</sup>

Проблема енергозбереження в Україні є найбільш важливою. Це стосується в першу чергу до чорної металургії, яка є найбільш енерго- і матеріаломісткою галуззю виробництва. Головний сенс енергозбереження – це економічний ефект, який може бути досягнутий лише за умови проведення активної і жорсткої, законодавчо підкріпленої політики.

Удосконалення технологічних процесів може знизити питомі витрати енергоресурсів. Необхідною умовою високих техніко-економічних показників киснево-конвертерного виробництва сталі є якість чавуну, яку визначають висока температура і стабільний хімічний склад від плавки до плавки. Отже, необхідно досліджувати наступний за виплавною процес передачі рідкого чавуну до сталеплавильного агрегату і знайти резерви щодо вдосконалення цього процесу з точки зору збереження тепла<sup>2</sup>. Збереження високої температури рідкого чавуну сприяє його економії. Існуючі методи оцінки термодинамічних процесів, що мають місце при транспортуванні рідкого чавуну і проведенні технологічних операцій, мають велику спільність і не можуть бути безпосередньо використані для конкретних підприємств. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення теоретичних і експериментальних досліджень на всіх етапах передачі розплавленого металу до сталеплавильного агрегату.

---

<sup>1</sup> Кравчук Н.М., Матросова І.Д. Тенденції розвитку металургійної промисловості України: глобальна конкурентоспроможність та інноваційний аспект. Приазовський економічний вісник. 2020. №1. С. 32–37.

<sup>2</sup> Sources of Iron Beyond 2015 // Steel Times.- 2005. V. 223. № 5. P. E-25-E-27, E-30

## 1. Виникнення передумов проблеми та формулювання проблеми

Чорна металургія є базовою галуззю в економіці країни<sup>3</sup>. У ринкових умовах, коли до якості сталі пред'являються підвищені вимоги, забезпечити вихід продукції на світовий ринок в умовах жорсткої конкуренції, можливо лише дотримуючись основних принципів ринку: висока якість продукції, що випускається, низька ціна<sup>4</sup>, а також забезпечення екологічної безпеки.

Киснево – конвертерний процес зайняв перше місце серед різних процесів виробництва сталі. Він являє собою поєднання сучасних технологій виплавки, позапічної обробки і безперервного розливання.

Для киснево – конвертерного виробництва велике значення має як стабільний хімічний склад, так і температура чавуну. Це дозволяє значно збільшити продуктивність сталеплавильних агрегатів в результаті стандартизації процесів і усунення плавок з додувки, а також скоротити втрати металу<sup>5</sup>.

Невід'ємною ланкою в технологічному процесі виплавки сталі з рідкого чавуну в конвертерних цехах є доставка рідкого металу з доменного цеху до міксерів цього цеху в чавуновозних ковшах.

Технологічні операції, десульфуратія і скачування шлаку, а також організаційні затримки при просуванні чавуну до сталеплавильного агрегату тягнуть за собою зниження температури металу. Звісно ж важливим мінімізувати втрати тепла при транспортуванні порожніх і наповнених чавуновозних ковшів з тим, щоб температура, що заливається в сталеплавильний агрегат чавуну була максимальною. При цьому виникає досить відчутна економія енергоресурсів.

На поверхні зіткнення чавуну з футеровкою жолобів мають місце втрати тепла теплопровідністю через кладку, а також на акумуляцію. Законмірність втрат тепла в проміжних ємностях (головному і транспортному жолобах), а також чавуном в ковшах, однакові. Втрати в ковші відбуваються в результаті акумуляції тепла кладкою, втрат теплопровідністю через стіни і днище і випромінюванням з відкритою поверхні шлаку і струменя чавуну, що стікає в ківш. Тривалість роботи транспортного жолоба, існування струменя і заповнення ковшів однаково одно часу випуску, втрати тепла на кожній ділянці залежать від температури чавуну і теплофізичних властивостей футеровок всіх ємностей, що стикаються з ним, а також співвідношень маси чавуну в

---

<sup>3</sup> Бесараб С.О. Сучасні тенденції розвитку підприємств металургійної галузі України. Інвестиції: практика та досвід. 2016. № 23. С. 62–65.

<sup>4</sup> Амоша О.І., Саломатіна Л.М. Інноваційний розвиток промислових підприємств у регіонах: проблеми та перспективи. Економіка України. 2017. № 3. С. 20–34.

<sup>5</sup> Nilles P.E. Steelmaking of the future // International Steelmak conference. 2008. Design centre Linz (Austria). P. 1-5.

них і тепловіддаючих поверхонь<sup>6</sup> Температура чавуну на випуску і в заповненому ковші відрізняється приблизно на 500<sup>0</sup>С, тобто приблизно на 3%, а теплофізичні властивості футеровки в результаті взаємодії з рідким чавуном приблизно однакові, тоді щільності потоків тепла на акумуляцію в ковші, а також головному і транспортних жолобах будуть однакові (з точністю до 3%). Отже, втрати тепла на акумуляцію в жолобах ливарного двору і в ковші будуть відрізнятися пропорційно їх поверхонь.

Актуальним завданням є практична потреба в розробці математичного апарату для вивчення теплообмінних процесів, що протікають під час просування рідкого чавуну від моменту випуску з ДП до заливання його в сталеплавильний агрегат. Та створення програмного забезпечення для візуалізації процесу, розрахунку його характеристик і оптимізації технологічних і конструкційних параметрів з метою підвищення якості продукції<sup>7</sup>

### *1. 1 Аналіз методів рішення*

За час доставки чавуну від ДП до сталеплавильного агрегату зниження температури в середньому становить 100<sup>0</sup>С. Втрати тепла рідким чавуном спостерігаються на всіх ділянках доставки. На випуску вони становлять близько 50% від загальних втрат і пов'язані з особливостями проведення випуску, пристроєм ливарного двору, а також температурою футеровки подаються під налив ковшів. Втрати тепла на випуску визначаються випромінюванням від струменя, з поверхні чавуну, частково покритого шлаком, акумуляцією тепла кладкою жолобів. За умовою зниження втрат тепла було б доцільно скорочувати час випуску, але при цьому погіршується поділ продуктів плавки і збільшуються втрати чавуну зі шлаком. При збільшенні тривалості випуску виникають додаткові втрати тепла.

В даний час немає чітко сформульованих заходів щодо зниження акумулюючих властивостей ковшів, які подаються під налив з температурою кладки не менше 700<sup>0</sup>. Цей факт не дозволяє економити додаткового тепла. Також немає наукового підходу до зниження втрат тепла кожухом ковша. Більшість заходів здійснюється візуально і залежить від кваліфікації персоналу. Як відомо людський фактор може привести до помилок, а точний математичний розрахунок завжди є більш надійним інструментом.

---

<sup>6</sup> Levitska T.O Dubovkina M.Y- Some aspects of changing the thermal properties of the lining of metallurgical units of periodic action. м. Маріуполь, 28 квітня 2021 р. / Маріупольський державний університет; Маріуполь: МДУ, 2021. – 197 с..

<sup>7</sup> Ситник В. Ф., Орленко Н. С. Імітаційне моделювання: Навч. посібник. – К.: КНЕУ, 2008. – 232

Математична модель теплообмінних процесів між рідким чавуном і футеровкою дозволить зробити висновок про доцільність використання більш щільного вогнетрива. Питання про скорочення втрат теплоти на акумуляцію можливо тільки після ретельного вивчення теплообмінних процесів між рідким чавуном і футеровкою протягом усього циклу роботи ковша. Також наукове питання про зменшення проникнення рідкого металу, як в пори, так і в шви, що дозволить не тільки зберегти його теплофізичні властивості, але і збільшити стійкість футеровки. Теплофізичні властивості внутрішнього шару футеровки (активного шару), змінюються за рахунок взаємодії з рідким чавуном і тільки математична модель дозволить визначити якою повинна бути величина коефіцієнта акумуляції для оптимального процесу, як зменшити взаємодію футеровки з чавуном, тобто знизити ймовірність проникнення металу в пористий вогнетрив і які основні заходи необхідно виконати, щоб активний робочий шар футеровки менше зношувався в процесі експлуатації.

У процесі охолодження порожнього ковша температура внутрішньої поверхні змінюється від  $T_k$  до  $T_{ox}$ , причому  $T_{ox}$ , як буде показано нижче, залежить від часу охолодження і теплофізичних властивостей футеровки.

Визначення температури на кордоні активного шару і решти футеровки необхідно для розрахунку зовнішніх втрат через кожух ковша, проте довідкові дані мають розбіжності, тому що вони отримані без урахування змін теплофізичних властивостей активного шару. Треба взяти до уваги, що в процесі експлуатації змінюються теплофізичні властивості шамоту. Скоріш за все, в першу чергу змінюється щільність. Якщо вважати, що теплофізичні властивості шамоту завжди постійні, це приводить до того, що розрахунки по довідковим даним значно відрізняються від експериментальних даних.

Математична модель дозволить отримати фактичні дані по теплофізичним властивостям будь-якої поверхні (футеровки), яка контактує з розплавленим металом та більш точно розрахувати час охолодження і прийняти рішення про те, яку футеровку треба використовувати<sup>8</sup>.

## ***1. 2 Огляд існуючих рішень та програм***

Аналогів програмного забезпечення для розрахунків теплофізичних властивостей футеровки не має. В роботі вирішується одна з проблем створення найбільш ефективної ресурсозберігаючої технології доставки рідкого чавуну до сталеплавильного агрегату. Всю технологію доставки

---

<sup>8</sup> Левицька Т.О. Дубовкіна М.Ю. Моделювання втрат температури в наповненому ковші ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2021. – 115 с. С. 106-107

чавуну необхідно розглянути як послідовність взаємопов'язаних елементів циклу, що становлять єдине ціле. Це дозволить розкрити невикористані раніше можливості по скороченню втрат тепла і підвищення ефективності обробки чавуну.

## 2. Математична модель

У кожному циклі внутрішня частина футеровки порожнього ковша за час транспортування охолоджується не на всю глибину, а лише частково. Цю частину назовемо активним шаром. Температурне поле іншої частини футеровки залишається практично без змін протягом усіх циклів.

Для отримання безперервної інформації про тепловому режимі роботи футеровки була розроблена вимірювальна схема, по якій контролювали температурне поле кладки та її знос по ходу роботи конвертера. Відповідно до технологічних етапів роботи конвертера температура змінювалася тільки в «активному» шарі футеровки, що безпосередньо примикає до робочої поверхні. Товщина цього шару для конвертера коливається в межах 80–120 мм.

Наше завдання полягає в тому, щоб визначити товщину активного шару стосовно чавуновозного ковша<sup>9</sup>. Розглянемо цю задачу докладніше. Перш за все, слід зазначити, що для наближених розрахунків, коли  $d_n : d_{вн} \leq 2$  ( $d_n$  – зовнішній діаметр,  $d_{вн}$  – внутрішній діаметр), можна розглядати циліндричну стінку з товщиною шару  $\Delta x = 0,5 (d_n - d_{вн})$ . Поверхню цієї стінки можна визначати по середньому діаметру  $d_{ср} = 0,5 (d_n + d_{вн})$ . Тоді  $F = 0,5\pi (d_n + d_{вн}) l$ . При такому спрощенні помилка у визначенні  $Q$  не перевищує 4% (в бік збільшення).

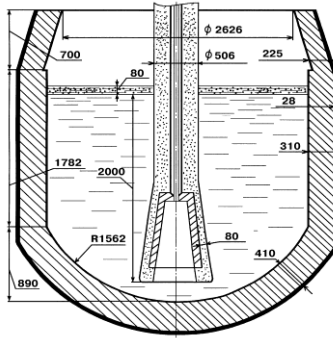
Схема чавуновозного ковша і погрузной фурми для продування металу представлена на рисунку 1.

Футеровка чавуновозного ковша складена з шамотної цегли згідно технологічної інструкції. Внутрішній діаметр ковша по кладці  $d_{вн} = 2918$  мм, зовнішній  $d_n = 3535$  мм. Ківш до пілотки вміщує 102,7 т чавуну щільністю 6750 кг/м<sup>3</sup>. Зменшення маси металу на 10 тонн відповідає зниженню рівня металу на 222 мм. Дзеркало металу в ківші становить 6,687 м<sup>2</sup>. Ківш викладений шамотною ущільненою цеглою з вмістом  $Al_2O_3$  32-37% щільністю 2150 кг/м<sup>3</sup> і має відкриту пористість 19%.

Несуча труба і розширювач фурми футеровані вогнетривкою масою, що складається з алюмосилікатної частини і вуглецевої – коксика. Частка алюмосилікатної частини 0,74 і коксика 0,26. Щільність маси 1410 кг/м<sup>3</sup> і пористість 35,5%. З урахуванням арматури (25% від загальної маси фурми) середня щільність фурми становить 1770 кг/м<sup>3</sup>.

---

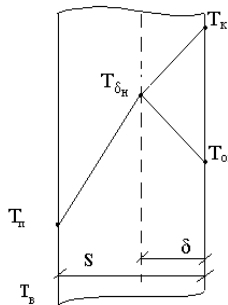
<sup>9</sup> Левицька Т.О. Дубовкіна М.Ю. Моделирование процессов тепловой работы футерования чавуновозных ковшей ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2020. – 106 с.



**Рис. 1. Схема чавуновозного ковша і продувної фурми**

Ківш призначений для транспортування чавуну з доменного цеху в сталеплавильний. Теплові процеси, пов'язані з транспортом рідкого чавуну є нестационарними. Однак на різних стадіях їх відхилення від стаціонарних процесів неоднаково і залежить від тривалості елементів циклу, які проходить ківш в період експлуатації.

Після декількох наливів чавуну формуються дві температурні зони – активний шар і решта футеровки. Після зливу чавуну за час доставки порожнього ковша під налив активний шар футеровки охолоджується на глибину  $\delta$  (рисунок 2). Поняття активного шару суперечить традиційному вирішенню завдань теплопровідності, згідно з якою швидкість поширення тепла є нескінченно великою. Теоретично визначити товщину активного шару можна, приймаючи кінцевої швидкість поширення тепла.



**Рис. 2. Розподіл температури в футеровці товщиною  $S$  [13]**

Середня швидкість поширення  $U$  тепла теплопровідністю можна знайти шляхом ділення коефіцієнту температуропровідності  $a$  на відстань, на яку поширюється цей потік (формула 2.1):

$$U = \frac{a}{\delta}, \quad (2.1)$$

де  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,  $\text{м}^2 / \text{с}$ ;

$\delta$  – відстань, на яке проникає обурення,  $\text{м}$ ,

тоді час поширення потоку тепла  $\tau$  визначається (формула 2.2)

$$\tau = \frac{\delta}{U} = \frac{\delta^2}{a} \quad (2.2)$$

звідки

$$\delta = \sqrt{a\tau}. \quad (2.3)$$

Після заповнення ковша відбувається прогрівання шару футеровки на глибину активного шару  $\delta_n = \sqrt{a\tau_n}$ . При охолодженні порожнього ковша, охолодження проникає на глибину, яка визначається часом охолодження. Розглянемо випадок, коли час нагрівання та охолодження рівні.

Після заповнення ковша відбувається прогрівання шару футеровки на глибину активного шару  $\delta_n = \sqrt{a\tau_n}$ . При охолодженні порожнього ковша, охолодження проникає на глибину, яка визначається часом охолодження. Розглянемо випадок, коли час нагрівання та охолодження рівні. Тоді залежно від сезону температура навколишнього повітря  $T_v$  коливається від  $+32^\circ\text{C}$  влітку до  $-23^\circ\text{C}$  взимку, тобто зміна температури не може перевищувати  $60^\circ\text{C}$ , а протягом 250 наливів взимку різниця може досягати  $30^\circ\text{C}$ .

Це означає, що температура на кордоні активного шару і решти футеровки  $T_{\delta_n}$ , а також температура зовнішньої поверхні ковша  $T_n$ , слабо змінюються за час експлуатації ковша і з достатнім для практики наближенням температурне поле футеровки, за винятком активного шару завтовшки  $\delta$ , можна прийняти стаціонарним. А в активному шарі за час  $\tau$ , температура на внутрішній поверхні футеровки буде коливатися від температури контакту  $T_k$  до температури охолодження  $T_{ox}$ . У процесі охолодження порожнього ковша температура внутрішньої поверхні змінюється від  $T_k$  до  $T_{ox}$ , причому  $T_{ox}$ , як буде показано нижче, залежить від часу охолодження і теплофізичних властивостей футеровки.

Визначення температури на кордоні активного шару і решти футеровки необхідно для розрахунку зовнішніх втрат через кожух ковша. Щільність потоку тепла в навколишнє середовище конвекцією визначається за формулою:

$$q_k = \alpha (T_n - T_o), \quad (2.4)$$

де  $\alpha$  – конвективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>К,  
а випромінювання (формула 2.5)

$$q_{изл} = C_0 \varepsilon \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right], \quad (2.5)$$

де  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла  
Вт/м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>;

$\varepsilon$  – ступінь чорноти для горловини прийнята рівною 1.

Щільність потоку, яка визначається згідно з формулами 2.4 і 2.5,  
дорівнює щільності потоку через шар футеровки товщиною  $S - \delta$  і  
визначається за виразом (формула 2.6):

$$q_{\Sigma} = q_k + q_{изл} = \frac{\lambda}{S - \delta} (T_{\delta_{ax}} - T_n) \quad (2.6)$$

з якого можна знайти температуру на кордоні активного шару і решти  
футеровки (формула 2.7)

$$T_{\delta_{ax}} = T_n + q_{\Sigma} \frac{(\delta - \delta_{ax})}{\lambda}. \quad (2.7)$$

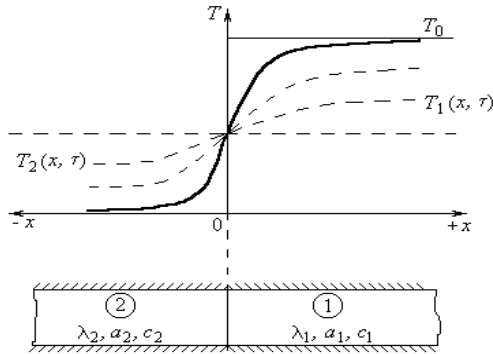
Температура контакту між двома тілами може бути визначена  
шляхом вирішення диференційного рівняння теплопровідності при  
крайових умовах четвертого порядку.

Теплові поля першого і другого стрижня, а також розподіл  
температури в них представлені на рисунку 3 і визначаються відповідно  
до таких виразів (формула 2.8, формула 2.9)

$$\frac{T_1(x, \tau) - T_{01}}{T_{01} - T_{02}} = \frac{K_{\varepsilon}}{1 + K_{\varepsilon}} \left( 1 + \frac{1}{K_{\varepsilon}} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_1\tau}} \right) \quad (2.8)$$

$$\frac{T_2(x, \tau) - T_{02}}{T_{01} - T_{02}} = \frac{K_{\varepsilon}}{1 + K_{\varepsilon}} \operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}}. \quad (2.9)$$





**Рис. 3. Температурне поле двох дотичних напівобмежених стрижень**

З цих рівнянь температура контакту може бути знайдена, якщо  $x = 0$ , у цьому випадку останній доданок в формулі 2.8 дорівнює нулю, а  $\operatorname{erfc} \frac{|x|}{2\sqrt{a_2\tau}}$  дорівнює одиниці і температура контакту  $T_1(0, \tau)$  та  $T_2(0, \tau)$  знаходиться з наступних рівнянь (формула 2.10 та 2.11):

$$\frac{T_1(0, \tau) - T_{01}}{T_{01} - T_{02}} = \frac{K_e}{1 + K_e}, \quad (2.10)$$

$$\frac{T_2(0, \tau) - T_{02}}{T_{01} - T_{02}} = \frac{K_e}{1 + K_e}. \quad (2.11)$$

Звідки випливає, що температура контакту залежать від критерію, що характеризує теплову активність першого стрижня по відношенню до другого (формула 2.12),

$$K_e = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} = \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}} \quad (2.12)$$

тобто від теплофізичних властивостей дотичних тіл: коефіцієнта теплопровідності –  $\lambda$ , Вт/м<sup>0</sup>С, теплоємності –  $c$ , кДж/кг<sup>0</sup>С, коефіцієнта температуропровідності –  $a$ , м<sup>2</sup>/с, и щільності –  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>. При  $\tau = \infty$  температури в обох стрижнях стають рівними температурі контакту, тобто температура контакту не змінюється протягом усього часу контакту (формула 2.13). Отже,

$$T_k = \frac{T_2 + T_1 \left( \frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2} \right)^{0.5}}{1 + \left( \frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2} \right)^{0.5}} \quad (2.13)$$

У зв'язку з тим, що це рішення засноване на законі Фур'є з якого випливає, що швидкість поширення тепла дорівнює нескінченності, рішення цього завдання вимагало використання стрижнів необмеженої довжини. Фактично швидкість поширення тепла кінцева, а глибина поширення тепла від поверхні контакту визначається часом та теплофізичними властивостями дотичних тіл. Тому той же результат можна отримати для тіл кінцевих розмірів. У рідкому чавуні на відміну від футеровки має місце і конвекція. З огляду на те, що при наповненні ковша швидкість підйому рівня чавуну невелика (кілька мм / с), поблизу футеровки утворюється прикордонний ламінарний шар, через який тепло передається тільки теплопровідністю. Для цих умов визначимо температуру контакту рідкого чавуну і футеровки ковша.

У зв'язку з кінцевою швидкістю теплопровідності, за малий інтервал часу обурення від контакту чавуну і футеровки буде поширюватися всередину футеровки і шару чавуну на деякі відстані  $\delta_1$  та  $\delta_2$ . Визначимо  $\delta_1$  и  $\delta_2$  через малий проміжок часу з моменту виникнення контакту. Швидкість потоку тепла, згідно (2.1), в футеровці  $U_1 = \frac{a_1}{\delta_1}$ , а  $U_2 = \frac{a_2}{\delta_2}$  в чавуні.

За час  $\tau$  в кладці потік тепла проникне на глибину  $\delta_1 = U\tau = \frac{a_1}{\delta_1}$ , в чавуні на глибину  $\delta_2 = U\tau = \frac{a_2}{\delta_2}$ , тоді  $\frac{a_1}{\delta_1^2} = \frac{a_2}{\delta_2^2}$ , звідси, враховуючи однаковий час проникнення потоку тепла в чавуні і футеровці, отримуємо (формула 2.14)

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \quad (2.14)$$

Кількість теплоти  $Q_1$ , що проходить через одиницю поверхні в одиницю часу, прямо пропорційна до коефіцієнта теплопровідності, різниці температур і обернено пропорційно товщині шару  $(T_k - T_1)$ , на яке проникає обурення (формула 2.15), тобто

$$Q_1 = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_k - T_1) \quad (2.15)$$

Так як ми розглядаємо процес за малий проміжок часу, то поблизу поверхні контакту з боку чавуну можливе існування тонкого шару, в

якому тепло переноситься як в твердому тілі теплопровідністю. Тоді кількість теплоти  $Q_2$  дорівнюватиме (формула 2.16):

$$Q_2 = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_k - T_2) . \quad (2.16)$$

Прирівняємо формули 2.15 та 2.16, отримаємо вираз (2.17) :

$$\frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_k - T_1) = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_2 - T_k) . \quad (2.17)$$

З виразу (2.17) знаходимо температуру контакту (формула 2.18):

$$T_k = \frac{T_2 + T_1 \frac{\lambda_1 \delta_2}{\lambda_2 \delta_1}}{1 + \frac{\lambda_1 \delta_2}{\lambda_2 \delta_1}} . \quad (2.18)$$

Підставимо формулу 2.14 в 2.18 і отримаємо (формула 2.19)

$$T_k = \frac{T_2 + T_1 \frac{\lambda_1 \sqrt{a_2}}{\lambda_2 a_1}}{1 + \frac{\lambda_1 \sqrt{a_2}}{\lambda_2 \sqrt{a}}} . \quad (2.19)$$

Так як  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ , тоді отримуємо вираз, аналогічний (2.13):

$$T_k = \frac{T_2 + T_1 \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_1 c_1 \rho_1}{\lambda_2 c_2 \rho_2}}} . \quad (2.20)$$

Як і передбачалося спочатку,  $T_k$  (формула 2.20) може набувати значень від  $T_1$  до  $T_2$ , залежить від температури дотичних тіл і їх теплофізичних характеристик. Хоча (2.13) і отриманий нами вираз для визначення температури контакту повністю збігається, його висновки істотно відрізняються. Рішення (2.13) строго справедливо для моментів часу рівних нулю і нескінченності, а отриманий вираз справедливий для будь-якого моменту часу. Зіставляючи перший і другий методи, можна прийти до висновку, що рішення для напівобмежених тіл можуть бути використані для тіл кінцевих розмірів, за умов глибини прогріву (охолодження) менше розміру тіла в напрямку потоку. Величина  $\delta$  визначається часом прогріву (охолодження) тіла і його теплофізичними

властивостями. Температура контакту  $T_k$  може істотно відрізнятися від температури чавуну  $T_2$ .

Так як втрати тепла активним шаром футеровки порожнього ковша компенсуються нагріванням його за рахунок втрат тепла чавуном, то його акумулюючу здатність можна визначити через втрати тепла випромінюванням футеровки при її охолодженні від  $T_k$  до температури, з якої подається ківш під налив  $T_{ок}$ .

Чугуновозні ковші відносяться до агрегатів періодичної дії, при цьому акумуляційні здатності матеріалу, з якого виконана футеровка, грають істотну роль<sup>10</sup>18. Якщо період нагрівання та охолодження активного шару багато менше циклу роботи агрегату періодичної дії, то в основній частині футеровки встановлюється режим теплопровідності, близький до стаціонарного.

Акумуляція тепла основною частиною футеровки має місце тільки при первинному нагріванні агрегату. Швидкість, яка визначається по (2.1) можна розглядати як швидкість встановлення стаціонарного режиму, тому що коефіцієнт температуропровідності визначається експериментально, для стаціонарного режиму.

Розглянемо теплообмін активного шару футеровки з навколишнім середовищем (рис. 2.2). Нехай час охолодження і нагрівання активного шару футеровки однакові, тоді і в період нагріву і в період охолодження товщина активного шару буде незмінною і визначається за формулою 2.3

Складемо тепловий баланс активного шару футеровки (формула 2.21)

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_2, \quad (2.21)$$

де  $\Delta Q_1$  – кількість тепла, що надходить до поверхні зсередини (тепло акумульоване шаром);

$\Delta Q_2$  – кількість тепла, що минає з цієї поверхні.

Так як поверхня і час однакові в процесі теплообміну, то має місце не тільки рівність (2.20), а й рівність (формула 2.21)

$$q_1 = q_2, \quad (2.22)$$

де  $q_1$  і  $q_2$  – щільності теплових потоків.

Рівність (2.22) має місце в будь-який момент часу. Щільності теплових потоків всередині активного шару визначаються його теплофізичними властивостями і різницею температур шару і поверхні. Останнє залежить від інтенсивності теплообміну з дотичною

---

<sup>10</sup> Дубовкіна М.Ю. Оптимізація втрат тепла через вогнетривну кладку агрегатів періодичної дії Implementation of modern scientific opinions in practice», March 20 – 21, 2023, Bilbao, Spain. P. 251–252.

середовищем. Температуру поверхні можна змінювати, змінюючи зовнішній теплообмін.

Щільність теплового потоку  $q_1$  при охолодженні може бути визначена за формулою, 2.23

$$q(\tau) = \sqrt{\lambda c \rho} (T_{\kappa} - T_{\alpha\kappa}) \frac{1}{\sqrt{\pi \tau}}. \quad (2.23)$$

Відповідно маємо формулу 2.24

$$\Delta Q_2 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\lambda c \rho \tau} (T_{\kappa} - T_{\alpha\kappa}). \quad (2.24)$$

Проаналізуємо величину  $\sqrt{\lambda c \rho \tau}$ . Підставимо замість  $\tau$  його значення з (2.2), тоді отримаємо (формула 2.25)

$$\sqrt{\lambda c \rho \tau} = \sqrt{c^2 \rho^2 \delta^2} = c \rho \delta. \quad (2.25)$$

Це є теплоємність охолодженої поверхні (з розмірністю Дж/м<sup>2</sup>·К) площею  $F = 1\text{ м}^2$ , тоді теплоємність охолодженого шару є величина  $c \rho \delta F$ , де  $F$  – площа поперечного перерізу цього шару. Таким чином,  $\sqrt{\lambda c \rho \tau} \cdot F (T_{\kappa} - T_{\alpha\kappa})$  – додаток теплоємності прогрітого шару на різницю температур, тобто  $\Delta Q$ , коефіцієнт  $\frac{2}{\sqrt{\pi}}$  завищує це значення на 13%.

Тоді маємо  $\Delta Q_1$  (формула 2.26)

$$\Delta Q_1 = \sqrt{\lambda c \rho \tau} (T_{\kappa} - T_{\alpha\kappa}) \quad (2.26)$$

а при охолодженні випромінюванням  $\Delta Q_2$  може бути визначена за формулою (2.27)

$$\Delta Q_2 = \varepsilon C_0 \left( \frac{T_{cp}}{100} \right)^4 \tau. \quad (2.27)$$

Оскільки кількість тепла, що надходить до поверхні зсередини охолоджуємого шару, дорівнює кількості тепла, що минає з цієї поверхні, використовуючи рівність (2.26) і (2.27), отримаємо (2.28)

$$\sqrt{\lambda c \rho \tau} (T_{\kappa} - T_{\alpha\kappa}) = C_0 \left( \frac{T_{cp}}{100} \right)^4 \tau. \quad (2.28)$$

$T_{cp}$  згідно окремого випадку теореми про повну загальну середню дорівнює:

$$T_{cp}^4 = \frac{1}{T_{\kappa} - T_{ox}} \int_{T_{nom}}^{T_{\mu}} T_{ox}^4 dT_{ox} = \frac{T_{\kappa}^5 - T_{ox}^5}{5(T_{\kappa} - T_{ox})}.$$

Так само, тоді маємо (формула 2.29)

$$\frac{\sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\tau_{ox}}} (T_{\kappa} - T_{ox}) = \varepsilon C_0 \frac{T_{\kappa}^5 - T_{ox}^5}{5(T_{\kappa} - T_{ox})}. \quad (2.29)$$

Потік з охолоджувальної внутрішньої поверхні зменшуємо відповідним співвідношенням площ  $F_{гор} / F_{вн}$ , де  $F_{гор}$  – площа горловини чавуновозного ковша,  $m^2$ ;  $F_{вн}$  – площа внутрішньої поверхні ковша, яка знаходиться в контакті з чавуном,  $m^2$  (формула 2.30, формула 2.31)

$$\frac{\sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\tau_{ox}}} (T_{\kappa} - T_{ox}) = C_0 \frac{T_{\kappa}^5 - T_{ox}^5}{5(T_{\kappa} - T_{ox})} \frac{F_{гор}}{F_{вн}} \quad (2.30)$$

або

$$\sqrt{\lambda c \rho} = A \frac{T_{\kappa}^5 - T_{ox}^5}{(T_{\kappa} - T_{ox})^2} \sqrt{\tau_{ox}}, \quad (2.31)$$

де  $A = \frac{1}{5} C_0 \frac{F_{гор}}{F_{вн}}$ ;

$\sqrt{\lambda c \rho}$  - коефіцієнт акумулюючої здатності.

Співвідношення (2.21) справедливо для будь-якого моменту часу в процесі охолодження футеровки чавуновозного ковша і рівняння (2.31) може бути використано для визначення теплофізичних властивостей футеровки.

### 3. Проектна модель

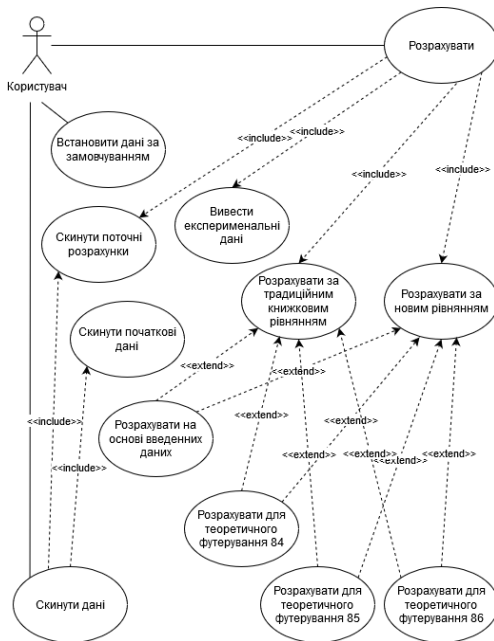
Призначення об'єктно-орієнтованого аналізу і проектування полягає в розгляді предметної області і логічного рішення задачі з точки зору понять і сутностей. Даний підхід застосуємо і до розроблюваної системи, оскільки для реалізації використовуються об'єктно-орієнтовані мова програмування і інструментарій.

#### 3.1 Діаграма варіантів використання

Діаграма варіантів використання, представлена на рисунку 4, відображає основні можливості системи, що розробляється.

На діаграмі варіантів використання описані три основних доступних для користувача варіанти використання і внутрішні дії, що включаються

в дані варіанти. Так скидання даних дозволить очистити форму додатків від результатів поточного розрахунку і введених користувачем даних, установка даних за замовчуванням заповнить поля додатки тестовими даними, дія розрахунку – виконає розрахунки по введеним і теоретичним даним.



**Рис. 4. Діаграма варіантів використання**

### 3. 2 Опис варіанту використання

Варіант використання – можливість модельованої системи (частина її функціональності), завдяки якій користувач може отримати конкретний, вимірний і потрібний йому результат. Варіант використання відповідає окремій функції системи, визначає один з варіантів її використання і описує типовий спосіб взаємодії користувача з системою.

Варіантом використання, що розглядається є варіант використання «Розрахувати». Метою варіанту використання є виконання розрахунку зміни температури контакту футеровки і чавуну в часі. Дійовою особою є користувач програми. Передумовами є наявність даних для розрахунку. Активатором є натискання кнопки «Розрахувати» користувачем.

- 1) Основний потік подій;
- 2) Система зчитує дані, введені в поля форми;
- 3) Система обчислює первинні температури контакту футеровки і чавуну для книжкового і нового методів розрахунку;
- 4) Розраховується зміна температури контакту від початкової  $T_k$  до температури футеровки;
- 5) Виводиться результат розрахунку;
- 6) Виводяться експериментальні дані.

Альтернативний сценарій: якщо не заповнені поля вихідних даних для розрахунку, вивести повідомлення про необхідність заповнити поля.

Таким чином, сценарій варіанта використання «Розрахувати» був розглянутий.

### **3. 3 Діаграма діяльності**

Діаграма діяльності – UML-діаграма, на якій показано розкладання деякої діяльності на її складові частини. Під діяльністю розуміється специфікація виконуваної поведінки у вигляді координованого послідовного і паралельного виконання підлеглих елементів – вкладених видів діяльності і окремих дій, з'єднаних між собою потоками, які йдуть від виходів одного вузла до входів іншого.

Діаграма діяльності для аналізованого варіанта використання «Розрахувати» представлена на рисунку 5.

### **4. Розробка програмного забезпечення**

Для реалізації математичної моделі для розрахунку температури контакту футеровки і чавуну і зміни її в часі, була вибрана мова програмування C ++. Дана мова програмування є об'єктно-орієнтованою, поєднує властивості як високорівневих, так і низькорівневих мов, має широкі можливості, є велика кількість довідкової та навчальної літератури з мови.

Як середовище програмування була обрана RADStudio. Середовище підтримує роботу з такими мовами програмування, як C, C ++, C #, Delphi. Крім того, середовище програмування добре документоване, існує велика кількість розробників, які використовують цю середу, і спільнот, присвячених їй.

Вікно самого додатка представлено на рисунку 6.

Додаток містить два набори полів для параметрів футеровки і чавуну: «Температура футеровки» ( «Futter temperature»), «Температура чавуну» ( «Iron temperature»), «Щільність» ( «Density»), «Теплоємність» ( «Heat capacity» ), «Теплопровідність» ( «Thermal conductivity»). Дані поля можна заповнювати як вручну, так і за допомогою кнопки «Встановити



за замовчуванням» ( «Set default»), яка заповнить їх стандартними параметрами шамотної цегли, використаної в експерименті, і чавуну.

За натисканням кнопки «Розрахувати» виконується розрахунок введених даних і наявних в додатку теоретичних значень щільності, теплоємності і теплопровідності для трьох типів шамотної цегли.

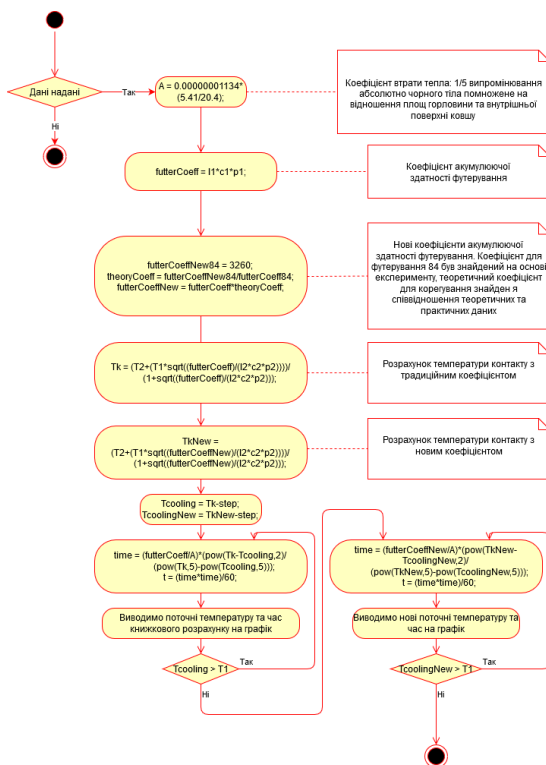
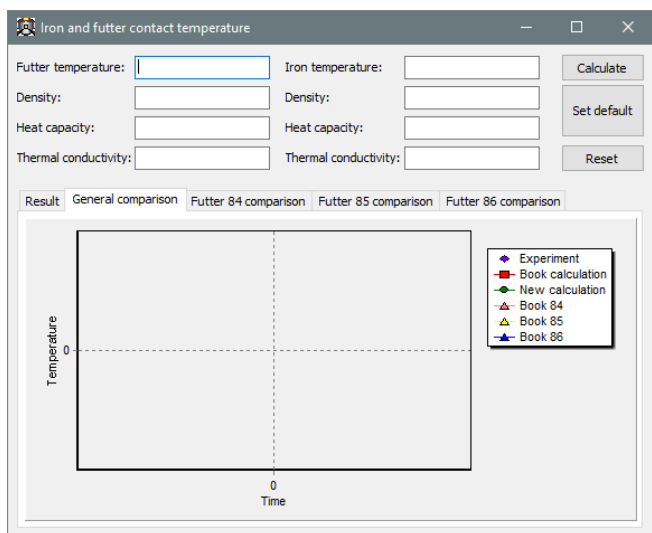
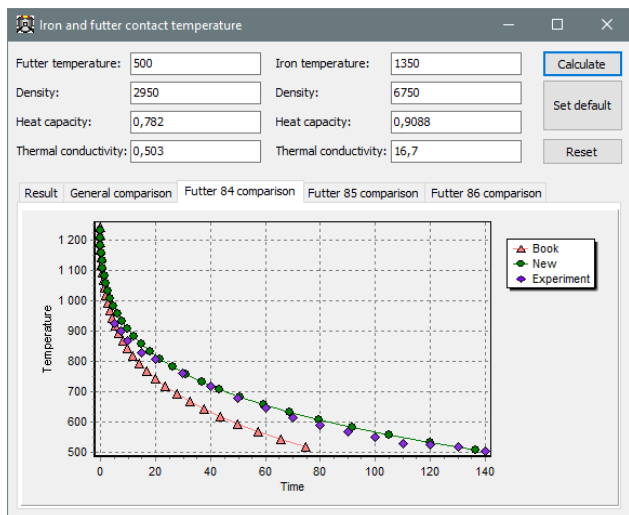


Рис. 5. Діаграма діяльності

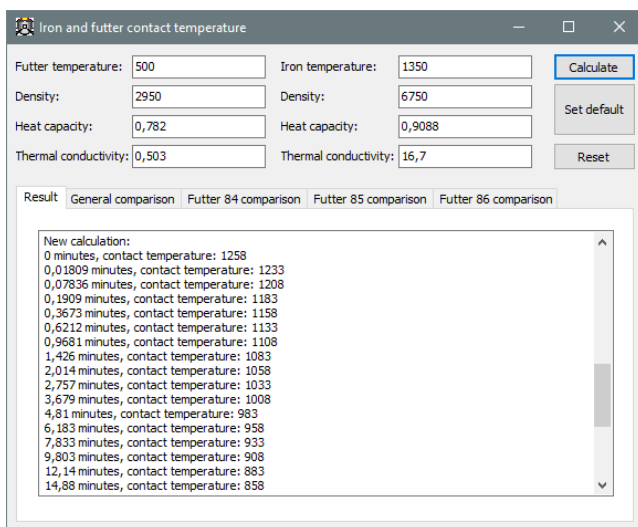
На різних вкладках додатки представлені результати в текстовому вигляді на вкладці «Результат» ( «Result»), так і у вигляді графіків (інші чотири вкладки). Графічний результат представлений на рисунку 7, текстовий – на рисунку 8.



**Рис. 6. Вікно додатка**



**Рис. 7. Додаток зі значеннями за замовчуванням, вкладка порівняння результатів розрахунку для одного з видів цегли**



**Рис. 8. Вкладка текстового представлення результатів розрахунку**

Всі графіки показують зміну температури контакту в часі і кожен виділений кольором і формою точки. Експериментальні дані відзначені ромбом, розрахунок з нових коефіцієнтів – круглої точкою, розрахунки для наявних в додатку типів цегли за традиційною формулою – трикутниками різного кольору, книжковий розрахунок для введених користувачем даних – квадратом.

## ВИСНОВКИ

Розроблена система моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів, що протікає в міру просування рідкого чавуну від моменту випуску з ДП до заливання його в сталеплавильний агрегат. Розроблена математична модель методу визначення втрат тепла на акумуляцію кладкою чавуновозного ковша, в якому враховані температура поверхні (контакту) футеровки – чавун, що залежить від теплофізичних властивостей вогнетрива і розплаву. В роботі встановлено зміну цих властивостей в результаті проникнення чавуну в шви і пори вогнетривкої кладки. Визначено фактичне значення коефіцієнта акумулюючої здатності футеровки чавуновозних ковшів, що дозволило встановити причину підвищених втрат на акумуляцію і намітити заходи щодо їх зниження.

Для досягнення мети у науковій роботі поставлені і вирішені наступні завдання:

- проведено аналіз відомих підходів до визначення втрат тепла на акумуляцію кладкою;
- обрано метод та засіб вирішення наукової проблеми;

- отримані залежності для визначення температури контакту футеровки з розплавом і товщини активного шару футеровки;
- удосконалено метод визначення втрат тепла на акумуляцію кладкою;
- визначені акумулюючі здатності активного шару футеровки в процесі експлуатації;
- розроблені системи моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів .

## **АНОТАЦІЯ**

Дана робота присвячена розгляду розробки системи моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів, від моменту випуску з ДП до заливання його в сталеплавильний агрегат. Актуальність полягає в візуалізації цього процесу, в розрахунку його характеристик і оптимізації технологічних і конструкційних параметрів з метою поліпшення якості продукції.

Метою є розробка програмної системи моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів, яка складається з визначення температури контакту футеровки з розплавом чавуну і визначення втрат тепла на акумуляцію кладкою. Завданням є розробка алгоритмів моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів та реалізації їх в системі з зручним інтерфейсом. Об'єктом є процес моделювання теплової роботи футеровки чавуновозних ковшів. Предметом є методи визначення температури контакту футеровки з розплавом чавуну і визначення впливу теплофізичних властивостей футеровки чавуновозного ковша на швидкість охолодження.

Систему розроблено в середовищі Microsoft Visual Studio за допомогою мови програмування C#. Завдяки розробленій системі моделювання визначено фактичне значення коефіцієнта акумулюючої здатності футеровки чавуновозних ковшів, що дозволило встановити причину підвищених втрат на акумуляцію і намітити заходи щодо їх зниження.

Розроблене програмне забезпечення можна використовувати для експериментальних досліджень фізичної сутності коефіцієнта акумулюючої здатності матеріалу.

## **Література**

1. Кравчук Н.М., Матросова І.Д. Тенденції розвитку металургійної промисловості України: глобальна конкурентоспроможність та інноваційний аспект. Приазовський економічний вісник. 2020. № 1. С. 32–37.
2. Sources of Iron Beyond 2015 // Steel Times.- 2005. V. 223. № 5. P. E-25-E-27, E-30

3. Бесараб С.О. Сучасні тенденції розвитку підприємств металургійної галузі України. Інвестиції: практика та досвід. 2016. № 23. С. 62–65.
4. Амоша О.І., Саломатіна Л.М. Інноваційний розвиток промислових підприємств у регіонах: проблеми та перспективи. Економіка України. 2017. № 3. С. 20–34.
5. Nilles P.E. Steelmaking of the future // International Steelmak conference. 2008. Design centre Linz (Austria). P. 1-5.
6. Levitska T.O Dubovkina M.Y- Some aspects of changing the thermal properties of the lining of metallurgical units of periodic action *Математичні методи, моделі та інформаційні технології у науці, освіті, економіці, виробництві*: III Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції з проблем вищої освіти і науки, (м. Маріуполь, 28 квітня 2021 р). Маріупольський державний університет; Маріуполь: МДУ, 2021. С. 92–95.
7. Ситник В. Ф., Орленко Н. С. Імітаційне моделювання: Навч. посібник. – К.: КНЕУ, 2008. – 232 с.
8. Левицька Т.О. Дубовкіна М.Ю. Моделювання втрат температури в наповненому ковпі *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій*: III Всеукраїнської конференції молодих учених (Маріуполь, 24 листопада 2021 р.) ВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2021. – 115 с. С. 106–107.
9. Левицька Т.О. Дубовкіна М.Ю. Моделювання процесів теплової роботи футерування чавуновозних ковшів. – *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій*: Всеукраїнської конференції молодих учених (Маріуполь, 24 листопада 2020 р.)/ ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь: ПДТУ, 2020. С. 79–81.
10. Дубовкіна М.Ю. Оптимізація втрат тепла через вогнетривну кладку агрегатів періодичної дії *The XI International Scientific and Practical Conference «Implementation of modern scientific opinions in practice»*, (Bilbao, Spain March 20 –21) / 2023. P. 251–252.

**Information about the authors:**

**Levytska Tetiana Oleksandrivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Computer Science  
State Higher Education Institution «Pryazovskyi State Technical University»  
19, Dmytro Yavornytskyi ave., Dnipro, 49005, Ukraine

**Dubovkina Marharyta Yuriivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Industrial Heat  
and Power Plants and Heat Supply  
State Higher Education Institution «Pryazovskyi State Technical University»  
19, Dmytro Yavornytskyi ave., Dnipro, 49005, Ukraine

## ENERGY AND TECHNOLOGICAL MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES FROM OUT-OF-FURNACE IRON PROCESSING TO CONTINUOUS CASTING

**Stoianov O. M., Petrenko V. O., Niziaiev K. G.**

### INTRODUCTION

The dynamics of economic development in a particular country or region shapes the results of gradual (evolutionary) changes in society and nature. The indicator of these changes is the level of energy efficiency of life.

It is this immutable condition for the development of society that determines the urgent need for rational energy consumption and reduction of its specific costs in all spheres of human activity. This direction is called energy saving<sup>1</sup>.

Energy conservation is the implementation of legal, organisational, scientific, production, technical, informational and economic measures aimed at the efficient use of energy resources and the involvement of renewable energy sources in the economic turnover. Energy saving in production can be quantified by an indicator called energy intensity<sup>2</sup>.

Based on the definition of energy saving as a set of measures aimed at efficient energy use, there is a requirement to limit the use of material resources of the environment, when it comes to the so-called non-renewable primary energy sources in the form of organic, mineral fuels (natural gas, oil) or raw materials (iron ore, limestone, magnesite, coal as a reducing agent, etc.), which is very relevant for the current conditions of steelmaking.

### *1. Modeling of cast iron out-of-furnace processes*

To carry out energy-technological modeling of modern technologies for the production of converter steel, studies of technologies for refining cast iron and steel were carried out and the main energy-consuming articles of continuous casting of steel were determined, depending on the grade range, energy intensity of steel.

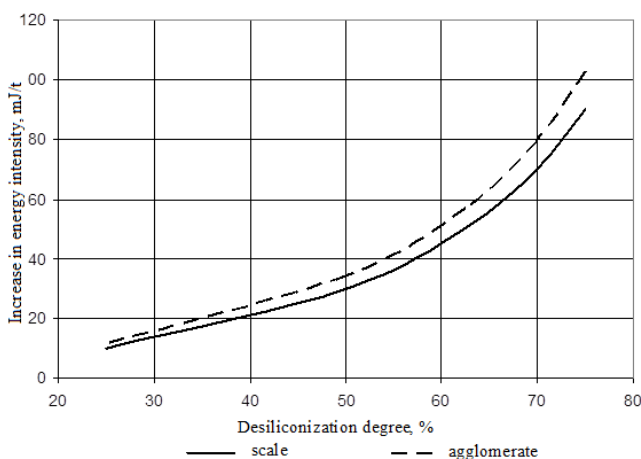
---

<sup>1</sup> Annual Energy Outlook 2010. U.S. Energy Information Administration, Washington, December 2009. URL: [<http://www.eia.doe.gov/neic/speeches/newell121409.pdf>]

<sup>2</sup> European Energy and Transport trends to 2030. – European Commission, Directorate General for Energy and Transport. Greece, 2003.

Using developed mathematical models<sup>3</sup>, energy-technological modeling of processes of out-of-furnace treatment of cast iron with the most common reagents was carried out.

Desiliconization of cast iron in production conditions is carried out by agglomerate, scale or mixtures based on them. The simulation was carried out for the following conditions: the final silicon content in cast iron is 0.3%, and the initial content varies between  $0.4 \div 1.2\%$ . Based on the simulation results, the dependence of the increase in the energy intensity of cast iron on the degree of desiliconization with agglomerate and scale was obtained (Fig. 1.1).



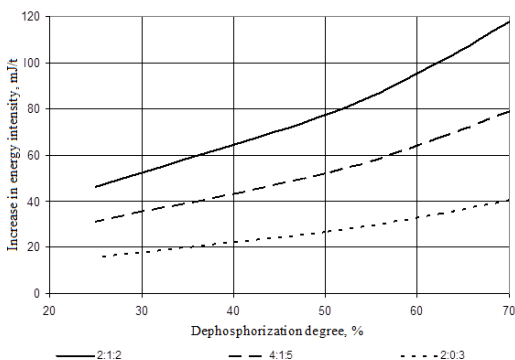
**Fig. 1.1. Dependence of the increase in the energy intensity of cast iron on the desiliconization degree by scale and agglomerate**

Figure 1.1 shows that the iron scale desiliconization operation is less energy intensive than the agglomerate.

To remove phosphorus from cast iron in conditions of out-of-furnace treatment, mixtures based on lime, soda, scale are used. For modeling, 3 mixtures of the above materials were selected in the ratio 2:1:2, 4:1:5, 2:0:3. As modeling conditions, the content of phosphorus in cast iron after treatment is 0.03%, and before treatment - within  $0.04 \div 0.1\%$ . The simulation results are shown in Figure 1.2.

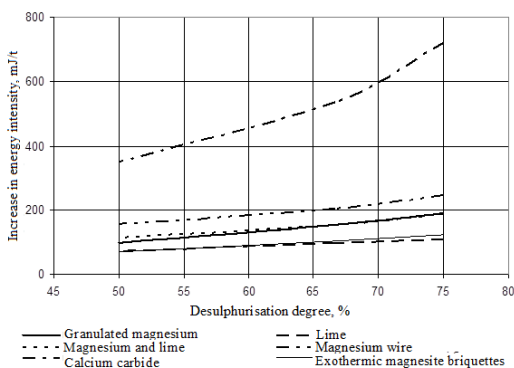
---

<sup>3</sup>Analiz energeticheskoi effektivnosti protsessov vnepechnoi obrabotki chuguna / Stoyanov A.N., Nizyaev K.G., Molchanov L.S.// XVII International scientific conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski. Czestochowa (Poland). 2016. P. 133–138.



**Fig. 1.2. Influence of the degree of cast iron dephosphorisation by a mixture of lime: soda : scale with different proportions of components on the increase in the energy intensity of cast iron**

Sulphur removal from cast iron in production conditions can be carried out by a number of reagents, among which the most common are granular magnesium, lime, their mixture, magnesium wire, calcium carbide and exothermic magnesite briquettes. The modelling was carried out under the following conditions: the final sulphur content in cast iron is 0.02%, and the initial content varies between 0.04% and 0.08%. The modelling results show the dependence of the increase in the energy intensity of cast iron on the degree of desulphurisation by the listed reagents (Fig. 1.3).



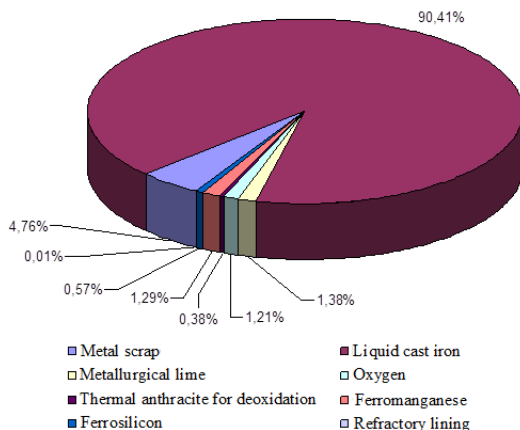
**Fig. 1.3. Dependence of the increase in energy intensity of cast iron on the degree of desulphurisation by different reagents**



Figure 1.3 indicates that the desulfurization of cast iron with calcium carbide is the most energy-intensive operation of all the out-of-furnace processes of cast iron. Exothermic magnesite briquettes add the same energy intensity as lime, which are the least energy-intensive of the listed reagents.

## 2. Simulation of oxygen converter process with upper oxygen purge

The main factor affecting the energy intensity of converter steel is the specific consumption of liquid cast iron<sup>4,5,6</sup>. This figure is about 90% (Fig. 1.4).



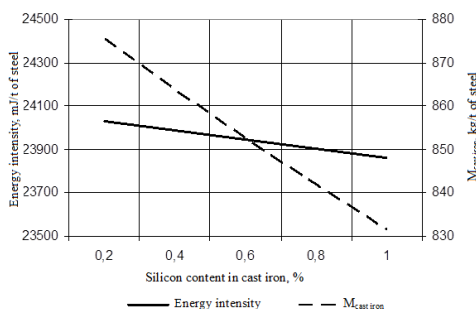
**Fig. 1.4. Share of charge materials in energy intensity of converter steel**

This factor, in turn, is determined by the chemical heat of cast iron, namely, the content of silicon in cast iron. Increasing the silicon content in cast iron not only increases the specific consumption of cast iron, but due to this leads to an increase in the energy intensity of converter steel by almost 20 MJ/t of steel for every 0.1% of silicon (Fig. 1.5). From this position, the question arises of the feasibility of off-furnace desiliconization of cast iron.

<sup>4</sup> Stoyanov A.N., Nizyaev K.G., Molchanov L.S., Righkin A.V. Uncontrolled parameters influence on material and energy consumption for BOF heat. *Metallurgical and Mining Industry*. No.5. 2017. p.52– 57.

<sup>5</sup> Harakterystyka materialo- i energovytrat pri vyrobnyztvi stali v konverternyh cegah Ukrainy, Germanii i Kitayu / K.G. Nizyaev, O.M. Stoyanov, L.S. Molchanov, S.V. Semiryagin, Jekongo Mujel Odrej Maks (student ME-02-15M). *Metal ta lyttya Ukrainy*. № 1. 2020. S. 64 – 71.

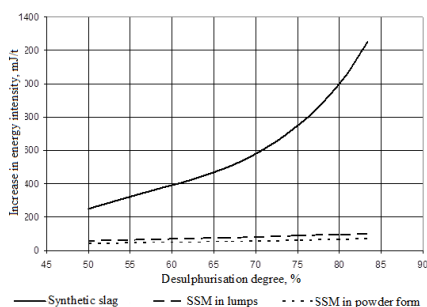
<sup>6</sup> Stoyanov O.M., Nizyaev K.G., Molchanov L.S., Ryzhkin A.V. Analiz vplyvu nekontrolevanyh parametriv na materialo- i energoemnist konverternoi plavky. *Metallurgiyi ta girnychorudna promyshlovist*. №1. 2017. S. 18 – 24.



**Fig. 1.5. Influence of silicon content in cast iron on its specific consumption and increase in energy intensity of liquid steel**

### 3. Modeling of steel out-of-furnace treatment

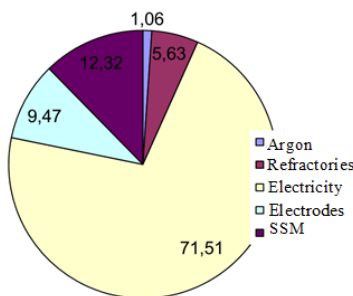
The purpose of out-of-furnace metal treatment is to prepare steel for continuous casting at the CCM. It includes steel heating, neutral gas purging, alloying and sometimes modification, and slag treatment for desulphurisation. Two main types of slag mixtures are used as the latter: synthetic slag (SS) and solid slag mixtures (SSM), which are added to the ladle in the form of lumps or powder<sup>7</sup>. For these three desulphurisation options, the modelling of the increase in the energy intensity of steel was carried out at the conditions of the initial sulphur content in steel of  $0.02 \div 0.06$  % and the final one of 0.01 %. The modelling results are shown in Figure 1.6.



**Fig. 1.6. Comparison of the increase in energy intensity of steel during desulphurisation at CCM with slag mixtures at different degrees of desulphurisation**

<sup>7</sup> Analiz energeticheskoi effektivnosti protsessov vnepechnoi obrabotki chuguna / Stoyanov A.N., Nizyaev K.G., Molchanov L.S.// XVII International scientific conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski. Częstochowa (Poland). 2016. P. 133–138.

Figure 1.6 illustrates the high energy intensity of synthetic slag processing compared to HSM, which is related to the method of slag feeding into the ladle, since the SS prepared in the furnace is added to the ladle in a molten state. In Fig. 1.7 the data on the distribution of the increase in energy intensity of steel by main genders are shown.



**Fig. 1.7. Weight average percentages of steel capacity increase during processing at the ladle-furnace unit**

#### ***4. Basic technological provisions of continuous steel casting***

Continuous casting is a much less energy-intensive way to produce steel billets compared to casting in a top-shelf mould and siphoning.

The energy intensity of the continuous casting process is determined by a number of factors, including the energy intensity of refractory materials (shotcrete in the ladles, devices to protect the jet from secondary oxidation, locking devices, etc.), slagging mixtures in the furnace and crystalliser, copper lining of the crystalliser, cooling water, process gases (natural gas, argon, oxygen and acetylene), electricity for equipment and automation systems, etc.

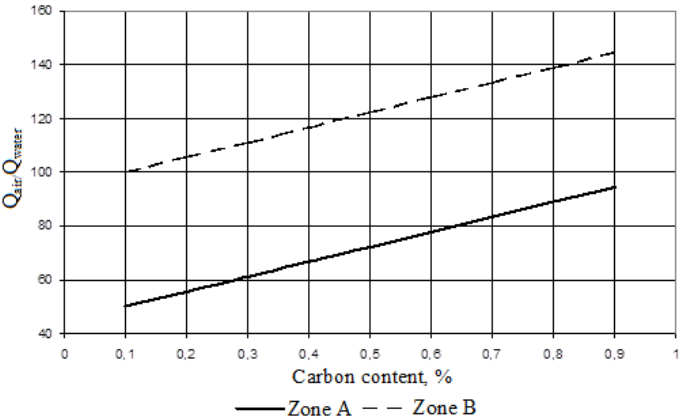
Almost all of the above items of energy consumption in the continuous casting process depend on the design features of CCMs and are almost the same for all machines. This includes, among others, the copper liner of the crystalliser, the energy intensity of which depends on the design of the crystalliser and, accordingly, the method of its manufacture. The specific energy consumption of such materials will be relatively constant, unaffected by the steel grade being poured. The same applies to refractory materials, process gases and electricity.

In contrast to the above factors, the specific energy intensity of cooling water and slagging mixtures depends on the steel grade being poured at the CCM. It is the specific energy consumption of these materials that will change

the energy consumption of the process of continuous casting of steel of different steel grades into long, bloom and slab billets.

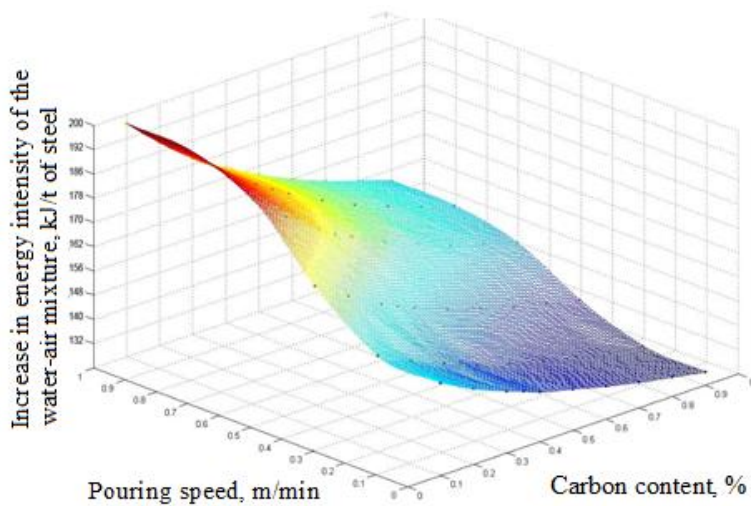
The optimal secondary cooling regime for ingot is determined by many factors that depend on the properties of the steel being cast, the type of CCM, etc. Secondary cooling must ensure rapid and complete solidification of the steel ingot, which allows for a reduction in the length of the secondary cooling zone and the entire CCM; and the permissible amount of deformation of the ingot metal. The conditions that contribute to the fulfilment of these requirements often contradict each other, and it is necessary to find the best solution for the adopted design of the secondary cooling zone. When the secondary cooling intensity increases to a known limit, heat removal increases and ingot solidification time decreases, which allows for higher casting speeds. However, too much cooling increases the number of cracks and deteriorates ingot quality.

In practice, water-air secondary cooling of the billet is widely used, where the ratio of water to air flow depends only on the carbon content of the steel in different parts of the secondary cooling zone. Figure 1.8 shows this dependence for the conditions of a 300×400 mm bloom 6-strand CCM at OJSC Dzerzhinsky Iron and Steel Works. The secondary cooling zone (SCZ) consists of 4 sections: the first two form zone A, and the last two form zone B.

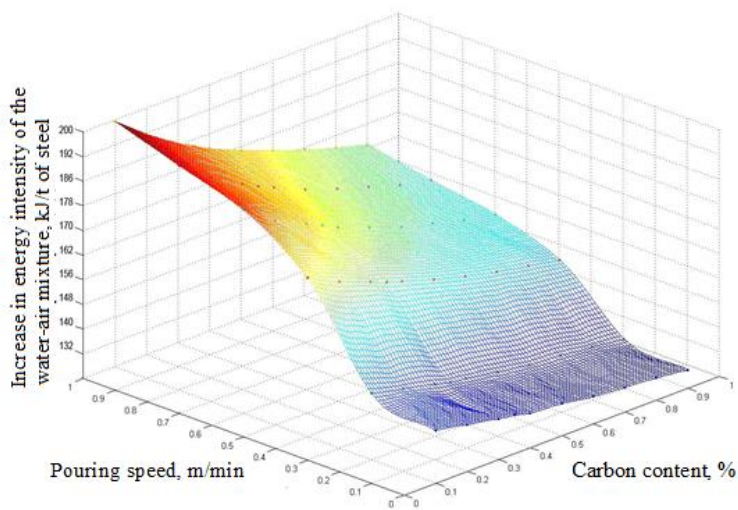


**Fig. 1.8. Dependence of the ratio of air and water volumetric flow rates on the carbon content of the steel being poured**

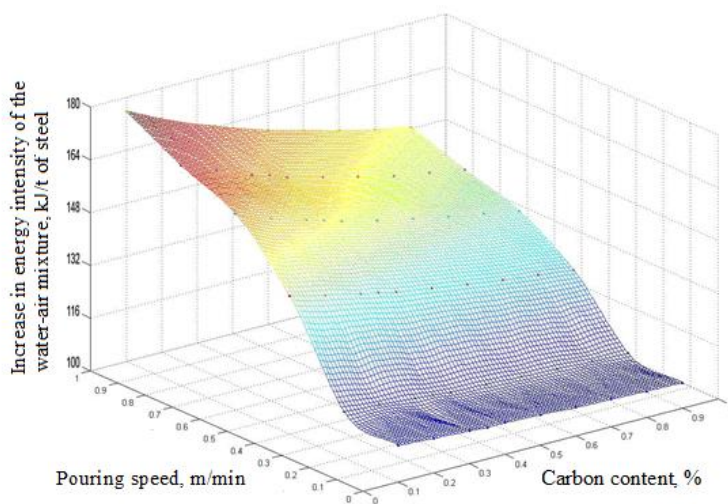
In turn, water consumption for cooling depends on the carbon content and the steel casting speed. The dependence of water consumption in the four areas of the CCM on the carbon content of the steel being cast and the casting speed is shown in Fig. 1.9.



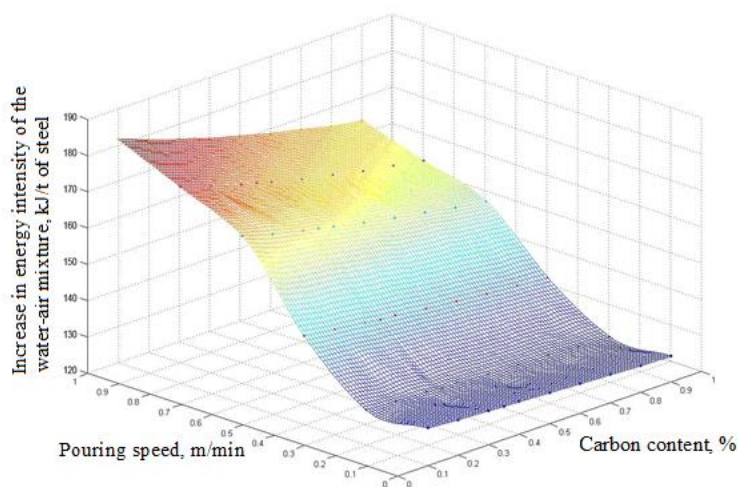
a



b



c



d

a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3, d) zone 4

**Fig. 1.9. Water consumption as a function of casting speed and carbon content of steel**

## CONCLUSIONS

Based on the energy and technological modelling, the article identifies the main factors that significantly affect the increase in the energy intensity of steelmaking, while the quantitative values of the energy intensity of metal, depending on the technology used at different stages of steelmaking, may differ by an order of magnitude. It is noted that there is a need to develop separate types of end-to-end steelmaking technologies depending on the steel grade and casting conditions.

## SUMMARY

Conducted energy-technological modeling of steelmaking processes. It is shown that at different stages of steel production, the increase in energy intensity of steel differs significantly and depends on the chosen technology, equipment and materials used. It has been established that for modern methods of off-blast refining of cast iron, the least energy-consuming technology is the use of mixtures based on lime and magnesium. For the oxygen-converter process, liquid cast iron contributes the largest increase in energy consumption, and for conditions of non-furnace processing of steel, the consumption of electricity for heating the metal. An assessment of the impact of the speed of steel pouring on the MBLZ and the carbon content in the metal on the energy costs of the process is also given.

## Bibliography

1. Annual Energy Outlook 2010. U.S. Energy Information Administration, Washington, December 2009. URL: [http://www.eia.doe.gov/neic/speeches/newell121409.pdf]
2. European Energy and Transport trends to 2030. – European Commission, Directorate General for Energy and Transport. Greece, 2003.
3. Аналіз енергетичної ефективності процесів позапічної обробки чавуну / Стоянов О.М., Нізяєв К.Г., Молчанов Л.С. // XVII International scientific conference “New technologies and achievements in metallurgy and materials engineering”: A collective monograph edited by Jarosław Boryca, Rafał Wyczółkowski. Czestochowa (Poland). 2016. P. 133 - 138.
4. Stoyanov A.N., Nizjaev K.G., Molchanov L.S., Righkin A.V. Uncontrolled parameters influence on material and energy consumption for BOF heat. *Metallurgical and Mining Industry*. No.5. 2017. p.52– 57.
5. Характеристика матеріало- та енерговитрат при виробництві сталі в конвертерних цехах України, Германії та Китаю / К.Г. Нізяєв, О.М. Стоянов, Л.С. Молчанов, С.В. Семирягін, Еконго Муэль Одрей Макс (студент МЕ-02-15М). *Метал та лиття України*. № 1. 2020. С. 64–71.

6. Стоянов О.М., Нізяєв К.Г., Молчанов Л.С., Рижкін А.В. Аналіз впливу неконтрольованих параметрів на матеріало- і енергоємність конвертерної плавки. *Металургійна та гірничорудна промисловість* № 1. 2017. С. 18–24.

**Information about the authors:**

**Stoianov Oleksandr Mykolayovych,**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Iron and Steel Metallurgy  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
2, Lazaryan Str., Dnipro, 49010, Ukraine

**Petrenko Vitalii Oleksandrovych,**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Acting Head of the Department of Intellectual Property and Project  
Management  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
2, Lazaryan Str., Dnipro, 49010, Ukraine

**Niziaiev Kostiantyn Georgiyovych,**

Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
Head of the Department of Iron and Steel Metallurgy  
Ukrainian State University of Science and Technologies  
2, Lazaryan Str., Dnipro, 49010, Ukraine



# 02

## CHAPTER

**Priorities  
for improving  
the operational  
efficiency  
of mining  
companies**

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ КОЛИВАНЬ БУРОВОГО ПОСТАВУ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ**

**Хілов В. С.**

### **ВСТУП**

Основою гірничо-металургійного комплексу України є підприємства по видобутку і переробці залізних руд, 77% виробничих потужностей яких сконцентровано у Криворізькому басейні Дніпропетровської області. Це п'ять із семи гірничо-збагачувальних комбінатів, які видобувають магнетитові кварцити і збагачують зміст заліза до 65%.

Труднощі з підтримки і розвитку гірничого виробництва полягають у тому, що на кар'єрах України працює велика кількість гірничих машин, які вичерпали свій нормативний термін служби. Усереднене зношення обладнання досягає 80–100%. У роботі знаходяться машини, які відпрацювали 1,5–2 нормативних терміну. Такий стан техніки вимагає модернізації або заміни застарілих машин новими.

Так, відповідно до програми розвитку гірничорудних підприємств Дніпропетровської області потреба у бурових верстатах (БВ) складає не менше 90 одиниць, екскаваторів і роторних комплексів – 65, великовантажних автосамоскидів – 158.

Наявність на території України науково-дослідних центрів, підприємств електротехнічної та машинобудівної промисловості, які опанували сучасні технології, дозволяє успішно вирішити існуючу проблему підтримки і підвищення ефективності виробництва залізрудної сировини.

Буріння вибухових свердловин шарошковими долотами – найбільш енерго- і матеріалоємний процес в існуючій технології видобутку корисних копалин відкритим способом. Вартість бурових робіт на кар'єрах складає від 16 до 36% загальних витрат, що припадають на видобуток тонни корисних копалин. Підвищення ефективності руйнування гірської породи шарошковим долотом безпосередньо пов'язане з рівнем досконалості приводних систем БВ.

Стійке зростання цін на енергоносії, електроенергію та витратні матеріали робить актуальним застосування енерго- і ресурсозберігаючих технологій при видобутку гірничих порід на кар'єрах України. На теперішній час це набирає більшої значимості, тому що на кар'єрах працюють БВ, які повністю вичерпали свій нормативний термін служби. Такий стан техніки спричинив не тільки

модернізацію існуючих БВ, але і впровадження БВ нового покоління із штангами більшої довжини і багатомасовою системою спусково-підйомних операцій і подачі (СПОП) поставу на вибій.

Ефективність буріння вибухових свердловин шарошковим способом безпосередньо визначається рівнем удосконаленості систем електропривода. Зараз впроваджуються на існуючих кар'єрних верстатах шарошкового буріння вибухових свердловин замість тиристорного привода постійного струму швидкодіючі приводні системи у загальнопромисловому виконанні з регульованими асинхронними двигунами, що живляться від автономних інверторів напруги з повністю керованими ключами.

Заміна тиристорного привода постійного струму з помірною швидкодією на швидкодіючий транзисторний привод змінного струму у механізмі обертання поставу на існуючих БВ, а також впровадження швидкодіючого транзисторного приводу змінного струму у механізмах обертання, подачі і СПОП поставу у БВ нового покоління характеризується підвищенням вібраційних навантажень на усі механічні конструкції БВ, що веде до виділення потоку механічної потужності не тільки в зоні вибою, яка спрямована на руйнування гірничої породи, а також і в конструктивних елементах безпосередньо на верстаті, що підвищує навантаження, які втомлюють матеріал верстата і призводять до аварійних виходів із строю конструктивних вузлів (як за правило бурової щогли).

Параметри системи керування привода обертання, що потребують налаштування, повинні враховувати частотні властивості бурового поставу. Тому необхідно визначитися з частотними властивостями бурових поставів, які застосовуються на кар'єрах України у шарошкових верстатах.

Тому розв'язання задачі з визначення вібраційних коливань бурового поставу в системах автоматизованого електроприводу, є актуальним.

### **1. Власні частоти коливань бурового поставу на початку буріння однією штангою**

При роботі бурового верстата на початку буріння однією штангою через взаємодію шарошки з твердими фракціями у породі в штанзі виникають не тільки вимушені, але і власні коливання. На цьому етапі буровий верстат піддається значним вібраційним навантаженням, тому що вільна довжина штанги над горловиною свердловини має максимальне значення.

Бурові постави верстатів, які використовуються при бурінні підривних свердловин, складаються зі штанг, що мають довжину від 8 до 11 м. Постав є стрижнем кільцевого поперечного перерізу, що

піддається осьовому стиску і крутінню у процесі проходки свердловини. При визначенні частот власних коливань постав розглядаємо як лінійну систему з розподіленими параметрами, у якій повздовжні, крутильні і поперечні коливання незалежні один від одного. Масою шарошки (60 кг) у порівнянні з масою штанги (1979 кг) – зневажаємо.

За об'єкт дослідження обрані бурові верстати СБШС-250Н (ВАТ «НКМЗ», м. Краматорськ, Україна) і СБШ-250МН-32 (ВАТ «Рудгормаш», м. Вороніж, РФ) параметри яких зведені у табл. 1.

Цілком аналогічний верстату СБШ-250МН-32 за технічними характеристиками є верстат УСБШ-250А, який випускається ВАТ «Криворізький завод гірничого машинобудування» (м. Кривий Ріг, Україна).

Таблиця 1

**Технічні характеристики бурових верстатів  
СБШ-250Н-32 (УСБШ-250А) і СБШС-250МН**

Показник	Тип верстата	
	СБШС-250Н	СБШ-250МН-32 (УСБШ-250А)
Довжина штанги поставу, м	11	8
Зовнішній діаметр штанг поставу, мм	219	203
Товщина стінок першої штанги поставу, мм	40	50
Товщина стінок нарощуваних штанг поставу, мм	25	25
Верхня межа зусилля подачі, кН	350	300
Верхня межа частоти обертання, об/хв	120	150

## **2. Повздовжні і крутильні частоти коливань поставу**

При визначенні власних частот коливань бурова штанга досліджувалась як лінійна система з рівномірно розподіленою масою за її довжиною. Довжина поставу після операцій згвинчування-розгвинчування змінюється дискретно. У конструкції, що досліджується, буровий постав є порожнім стрижнем круглого поперечного перерізу<sup>1</sup> [54, 105], один кінець якого шарнірно спирається через долото на вибій<sup>2</sup>, а інший має ковзне защемлення у натискній траверсі головки бурового снаряду, при цьому стрижень випробує тиск від зусилля подачі R (рис. 1). Відповідно до цієї

<sup>1</sup> Abu-Mahfouz, I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(7), 2003. 710 p.

<sup>2</sup> Arvajah, T., & Ismail, F. Machining stability in high-speed drilling— Part 1: Modeling vibration stability in bending. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46(12), 2006. 1569 p.

розрахункової схеми для визначення власних частот повздовжніх і крутильних коливань складаємо відповідні диференціальні рівняння. Для повздовжніх коливань<sup>3</sup>

$$\partial^2 u / \partial t^2 = C_1^2 \cdot \partial u / \partial x, \quad (1)$$

де  $u$  – повздовжні переміщення поточного перетину поставу;

$C_1 = \sqrt{E/\rho}$  – жорсткість матеріалу штанги поставу;  $E$  – модуль пружності матеріалу штанги поставу;  $\rho$  – щільність матеріалу штанги поставу;  $x$  – поточна лінійна координата;  $t$  – поточний час.

Рішення рівняння (1) містить власну форму коливань

$$X_u = C_u \cdot \sin(\omega_u \cdot x / C_1) + D_u \cdot \cos(\omega_u \cdot x / C_1), \quad (2)$$

де  $C_u, D_u$  – довільні постійні;  $\omega_u$  – власна частота повздовжніх коливань.

При підстановці рівняння (2) у граничні умови, що характеризують роботу однією штангою на початку буріння, одержуємо ( $x = 0$  – початок і  $x = l$  – кінець поставу): коли  $x = 0$ , то  $X_u = 0$ , а якщо  $x = l$ , то  $X'_u = 0$  і приходимо до рівняння  $\cos(\omega_u \cdot l / C_1) = 0$ , корені якого визначають власні частоти повздовжніх коливань

$$\omega_u = (2 \cdot n - 1) \cdot \pi \cdot \sqrt{E/\rho} / 2/l,$$

де  $n = 1, 2, 3, \dots$

Аналогічно визначаються власні частоти крутильних коливань, диференціальне рівняння яких:

$$\partial^2 \phi / \partial t^2 = C_2^2 \cdot \partial^2 \phi / \partial x^2, \quad (3)$$

де  $\phi$  – кут повороту перетину штанги.

Рівняння (3) містить у рішенні відповідну власну форму:

$$X_\phi = C_\phi \cdot \sin(\omega_\phi \cdot x / C_2) + D_\phi \cdot \cos(\omega_\phi \cdot x / C_2), \quad (4)$$

де  $C_\phi, D_\phi$  – довільні постійні;  $C_2 = \sqrt{G/\rho}$  – жорсткість матеріалу штанги поставу на крутіння;  $G$  – модуль зсуву матеріалу штанги поставу.

Граничні умови для рішення рівняння (3) у розглянутому випадку наступні: при  $x = 0$  маємо  $X'_\phi = 0$ , а при  $x = l$  маємо  $X'_\phi = 0$ .

При виконанні цих умов, використовуючи вираз (4), приходимо до рівняння  $\sin(\omega_\phi \cdot l / C_2) = 0$ , рішення якого дає значення власних частот крутильних коливань:

$$\omega_\phi = n \cdot \pi \cdot \sqrt{G/\rho} / l.$$

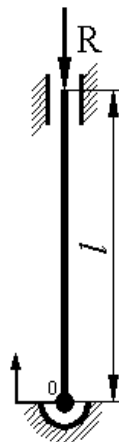


Рис. 1.  
Розрахункова  
схема бурового  
поставу

<sup>3</sup> Ema, S., & Marui, E. Theoretical analysis on chatter vibration in drilling and its suppression. Journal of Materials Processing Technology, 138(1), 2003. 575 p.

Для верстата СБШС-250Н, розробленого ВАТ НКМЗ, при розрахункових даних:  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $\rho = 8,01 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $l = 11$  м,  $G = 8 \cdot 10^4$  МПа, кількісні значення найнижчих частот власних повздовжніх і крутильних коливань штанги поставу визначилися як:

$$\omega_u = 700 \text{ 1/с}; \omega_\phi = 902 \text{ 1/с}.$$

У верстаті СБШ-250МН-32 (аналог УСБШ-250А) довжина першої штанги  $l = 8$  м, – найнижчі частоти повздовжніх і крутильних коливань штанги приймають значення:

$$\omega_u = 981 \text{ 1/с}; \omega_\phi = 1241 \text{ 1/с}.$$

### 3. Поперечні частоти коливань поставу

При визначенні власних частот поперечних коливань штанги поставу необхідно враховувати зусилля тиску подачі R.

У цьому випадку диференціальне рівняння вільних поперечних коливань штанги має вигляд<sup>4</sup>:

$$E \cdot J \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + R \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (5)$$

де  $E \cdot J$  – жорсткість штанги поставу при вигині;  $J$  – осьовий момент інерції;  $R$  – зусилля подачі;  $m$  – інтенсивність розподіленої маси штанги;  $y$  – поперечне відхилення штанги.

Часткове рішення рівняння (5) наступне:

$$y = X_y(x) \cdot T(t). \quad (6)$$

При підстановці (6) у вираз (5) приходимо до двох рівнянь

$$\frac{\ddot{T}}{T} = -\omega_p^2 \quad \text{і} \quad \frac{E \cdot J}{m} \cdot (X_y^{IV} + a^2 \cdot X_y^{II}) = \omega_p^2,$$

де  $\omega_p$  – власні частоти поперечних коливань;  $a = \sqrt{R/E/J}$  – коефіцієнт.

Перше з цих рівнянь відповідає коливальному характеру рішення, а друге дозволяє знайти власні частоти поперечних коливань  $\omega_p$ :

$$X_y^{IV} + a^2 \cdot X_y^{II} - k^4 \cdot X_y = 0, \quad (7)$$

де  $k = \sqrt[4]{\omega_p^2 \cdot m/E/J}$  – проміжна змінна.

Рішення рівняння (7) наступне:

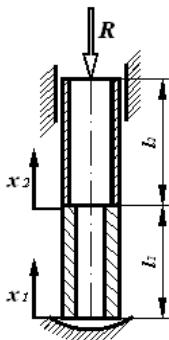
$$X_y = C'_1 \cdot sh(S_1 \cdot x) + C'_2 \cdot ch(S_1 \cdot x) + C'_3 \cdot sin(S_2 \cdot x) + C'_4 \cdot cos(S_2 \cdot x), \quad (2.8)$$

де  $S_1 = \sqrt{0,25 \cdot a^4 + k^4} - 0,5 \cdot a^2$ ;  $S_2 = \sqrt{0,5 \cdot a^2 + \sqrt{0,25 \cdot a^4 + k^4}}$ ;  $C'_1, C'_2, C'_3, C'_4$  – довільні постійні.

У випадку, який досліджуємо, можна вважати, що нижній кінець штанги шарнірно спирається через долото на вибій (при  $x = 0$  маємо  $X_y = 0, X'_y = 0$ ), а верхній кінець – замкнуто у ковзне защемлення у натискної траверсі головці бурового снаряду (при  $x = l$  маємо  $X_y = 0$ ,

---

<sup>4</sup> Lee, B. Y., Liu, H. S., & Tarng, Y. S. Modeling and optimization of drilling process. Journal of Materials Processing Technology, 74(1), 1998. 157 p.



**Рис. 2. Розрахункова  
схема бурового постапу  
при нарощуванні однією  
штангою**

$X'_y = 0$ ). Задовольняючи граничним умовам, знаходимо, що довільні постійні в рішенні (8)  $C'_2 = 0$  і  $C'_4 = 0$ , а  $C'_1$  і  $C'_3$  не дорівнюють нулю у тому випадку, якщо визначник системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} C'_1 \cdot sh(S_1 \cdot l) + C'_3 \cdot sin(S_2 \cdot l) &= 0, \\ C'_1 \cdot S_1 \cdot ch(S_1 \cdot l) + C'_3 \cdot S_2 \cdot cos(S_2 \cdot l) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

дорівнює нулю. Виконуючи цю умову, приходимо до трансцендентного рівняння для визначення частот  $\omega_p$  вільних поперечних коливань:

$$S_2 \cdot th(S_1 \cdot l) - S_1 \cdot tg(S_2 \cdot l) = 0 \quad (9)$$

У залежності від міцності порід, що буряться змінюється і лінійна швидкість проходки. Для її підтримки можна збільшувати частоту обертання постапу або осьове зусилля подачі, що можливо завдяки установці на буровий верстат двох незалежних приводних систем із плавним регулюванням зусилля подачі і частоти обертання.

У процесі буріння зусилля подачі  $R$  можемо плавно регулювати, відповідаючи вимогам ведення технологічного процесу, а також з урахуванням зміни фізико-механічних характеристик порід. Для бурового верстата СБШС-250Н межеве значення величини  $R$  складає 350 кН. Використовуючи в якості початкових даних основні параметри цього верстата, при рішенні рівняння (9) одержано залежність зміни нижчої власної частоти  $\omega_p$  поперечних коливань штанги від зусилля подачі  $R$ .

З проведеного аналізу виходить, що зі збільшенням зусилля подачі  $R$  частота  $\omega_p$  зменшується. Однак на всьому діапазоні зміни зусилля подачі її величина змінюється не більше ніж на 6%. Аналогічні графіки для частот більш високих порядків тут не наведені, тому що вони значно перевищують (у 3 і більше разів) частоту зрізу зовнішнього контуру 200 1/с і потрапляють у його смугу загасання.

#### **4. Власні частоти коливань бурового постапу при нарощуванні штанг**

У процесі буріння підривної свердловини постав нарощується шляхом приєднання до нього стандартних штанг. Для верстата СБШС-250Н цих штанг може бути чотири, кожна довжиною по 11 м, а для верстата СБШ-250МН-32 – так само чотири, але довжиною 8 м. Зі зміною загальної довжини бурового постапу змінюється спектр власних частот повздовжніх, крутильних і поперечних коливань. При визначенні цих частот постав можна представити у вигляді стрижня, що складається з двох ділянок – нижньої і верхньої (рис. 2) На нижній ділянці розташована штанга більшої товщини (забурник), на верхній –

одна або більше штанг із меншою товщиною стінок. Зовнішній діаметр штанг однаковий.

Штанги між собою єднуються нарізним сполученням за допомогою спеціальних муфт. При дослідженні коливань такого поставу складаємо форми коливань (амплітудні функції) на кожній ділянці таким чином, щоб вони задовольняли граничним умовам сполучення ділянок<sup>5</sup>.

#### 4.1. Повздовжні і крутильні коливання

Незалежно від кількості приєднаних штанг постав можна представити у вигляді стрижня, що складається з двох ділянок, на межі яких дискретно змінюється площа поперечного перерізу.

При визначенні власних частот повздовжніх коливань  $\omega_u$  власні форми коливань на першій і другій ділянці записуються у вигляді:

$$X_{ui} = C_{ui} \cdot \sin(\omega_u \cdot x_i / C_1) + D_{ui} \cdot \cos(\omega_u \cdot x_i / C_1), \quad (10)$$

де  $i = 1, 2$  – порядковий номер ділянки поставу;  $x_1, x_2$  – поточні координати на першій та другій ділянці;  $C_{ui}, D_{ui}$  – довільні постійні, обумовлені з граничних умов та умов сполучення ділянок бурового поставу.

Граничні умови та умови сполучення ділянок наступні:

– при  $x_1 = 0$  маємо  $X_{u1} = 0$  (переміщення дорівнює 0);

– при  $x_2 = l_2$  маємо  $X'_{u2} = 0$  (припускаємо, що постійно діюча сила  $R$  не впливає на значення частот повздовжніх коливань і нею можна знехтувати;  $l_2$  – довжина другої штанги);

– при  $x_1 = l_1, x_2 = 0$  маємо  $X_{u1} = X_{u2}$  і  $E \cdot F_1 \cdot X'_{u1} = E \cdot F_2 \cdot X'_{u2}$ ,

де враховано, що переміщення і зусилля на межі ділянок рівні ( $F_1, F_2$  – площі поперечних перерізів ділянок).

Підставляючи (10) у граничні умови та умови сполучення ділянок, приходимо до системи алгебраїчних рівнянь відносно  $C_{ui}, D_{ui}$ :

$$\left. \begin{aligned} D_{u1} &= 0; \\ C_{u2} \cdot \omega_u / C_1 \cdot \cos(\omega_u \cdot l_2 / C_1) - D_{u2} \cdot \omega_u / C_1 \cdot \sin(\omega_u \cdot l_2 / C_1) &= 0; \\ C_{u1} \cdot \sin(\omega_u \cdot l_1 / C_1) &= D_{u2}; \\ E \cdot F_1 \cdot C_{u1} \cdot \omega_u / C_1 \cdot \cos(\omega_u \cdot l_1 / C_1) &= E \cdot F_2 \cdot C_{u2} \cdot \omega_u / C_1. \end{aligned} \right\}$$

Вводимо позначення  $a_1 = \omega_u \cdot l_1 / C_1, a_2 = \omega_u \cdot l_2 / C_1$  і після перетворень приходимо до рівняння:

$$\operatorname{tg} a_1 \cdot \operatorname{tg} a_2 = F_1 / F_2.$$

При роботі двох штанг однакової довжини ( $l_1 = l_2$ ) одержимо:

$$\operatorname{tg}^2(\omega_u \cdot l / C_1) = F_1 / F_2,$$

звідки власні частоти повздовжніх коливань

$$\omega_u = C_1 / l \cdot (\arctg \sqrt{F_1 / F_2} + \pi \cdot n),$$

де  $n=0, 1, 2, \dots$

---

<sup>5</sup> Mehrabadi, I. M., Nouri, M., & Madoliat, R. Investigating chatter vibration in deep drilling, including process damping and the gyroscopic effect. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 49(12), 2009. 941 p.



При роботі трьох штанг, з яких дві верхні однакової товщини і довжини ( $l_2 = 2 \cdot l$ ,  $a_1 = \omega_u \cdot l / C_1$ ,  $a_2 = 2 \cdot a_1$ ), рівняння для визначення власних частот повздовжніх коливань  $\omega_u$  прийме вид:

$$tga_1 \cdot tg(2 \cdot a_1) = F_1 / F_2.$$

З цього рівняння  $tga_1 = \sqrt{F_1 / (F_1 + 2 \cdot F_2)}$ , звідкіля

$$\omega_u = C_1 / l \cdot (\arctg \sqrt{F_1 / (F_1 + 2 \cdot F_2)} + \pi \cdot n).$$

При роботі чотирьох штанг відповідно

$$l_2 = 3 \cdot l, a_1 = \omega_u \cdot l / C_1, a_2 = 3 \cdot a_1$$

і приходимо до  $tga_1 \cdot tg(3 \cdot a_1) = F_1 / F_2$ , або після перетворень

$$tg^4 a_1 - 3 \cdot tg^2 a_1 \cdot (1 + F_1 / F_2) + F_1 / F_2 = 0.$$

Найменший корінь цього рівняння

Таблиця 2

Значення нижчих власних частот повздовжніх коливань

Тип верстата	Кількість штанг							
	Одна		Дві		Три		Чотири	
	$l, \text{м}$	$\omega_u, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_u, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_u, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_u, \text{с}^{-1}$
СБШС-250Н	11	700	22	391	33	257	44	187
СБШ-250МН-32	8	981	16	571	24	373	32	272

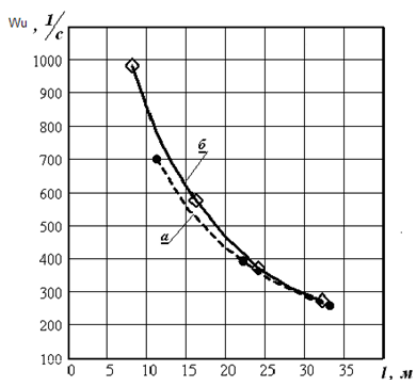


Рис. 3. Залежності значень нижчої частоти власних повздовжніх коливань від довжини бурової штанги для верстатів: СБШС-250Н (а) і СБШ-250-МН-32 (б)

$$\omega_u = C_1 / l \cdot \arctg \sqrt{0,5 \cdot \left( 3 \cdot (1 + F_1 / F_2) - \sqrt{9 \cdot (1 + F_1 / F_2)^2 - 4 \cdot F_1 / F_2} \right)}$$

Результати прорахованих значень нижчих власних частот повздовжніх коливань для верстатів СБШС-250Н та СБШ-250МН-32 наведені у табл. 2, рис. 3.

З наведених на рис. 3 залежностей виходить, що зі збільшенням довжини штанги нижча власна частота повздовжніх коливань зменшується за нелінійним законом. Найбільший відсоток зміни частоти спостерігається при приєднанні другої штанги (зменшення досягає 42–45%). Значення частот  $\omega_u$  для верстата СБШ-250МН-32 незначно (на 0,5%) вище саме таких же частот для верстата СБШС-250Н.

Аналогічно визначимо власну частоту крутильних коливань. Для двох ділянок бурового постау власні форми крутильних коливань записуються так:

$$X_{\phi i} = C_{\phi i} \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot x_i / C_2) + D_{\phi i} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot x_i / C_2), \quad (11)$$

де  $i=1, 2$  – порядковий номер ділянки постау;  $C_{\phi i}, D_{\phi i}$  – довільні постійні, обумовлені граничними умовами і умовами сполучення ділянок;  $C_2 = \sqrt{G/\rho}$  – жорсткість матеріалу штанги постау на кручення.

Граничні умови та умови сполучення ділянок наступні:

– при  $x_1 = 0$  маємо  $X'_{\phi 1} = 0$  і при  $x_2 = l_2$  маємо  $X'_{\phi 2} = 0$  (крутильні моменти на кінцях штанги дорівнюють нулю);

– при  $x_1 = l_1, x_2 = 0$  і  $X_{\phi 1} = X_{\phi 2}$  і  $G \cdot J_{p1} \cdot X'_{\phi 1} = G \cdot J_{p2} \cdot X'_{\phi 2}$ ,

де враховано, що кути повороту і крутні моменти у місці стикування штанг різної товщини рівні ( $J_{p1}, J_{p2}$  – осьові моменти інерції нижньої і верхньої частини штанги).

Підставляючи (11) у граничні умови та умови сполучення ділянок приходимо до системи алгебраїчних рівнянь відносно  $C_{\phi i}$  і  $D_{\phi i}$ :

$$\left. \begin{aligned} C_{\phi 1} &= 0; \\ C_{\phi 2} \cdot \omega_{\phi} / C_2 \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot l_2 / C_2) - D_{\phi 2} \cdot \omega_{\phi} \cdot \sin(\omega_{\phi} l_2 / C_2) &= 0; \\ D_{\phi 1} \cdot \cos(\omega_{\phi} \cdot l_1 / C_2) &= D_{\phi 2}; \\ -J_{p1} \cdot D_{\phi 1} \cdot \omega_{\phi} / C_2 \cdot \sin(\omega_{\phi} \cdot l_1 / C_2) &= J_{p2} \cdot C_{\phi 2} \cdot \omega_{\phi} / C_2. \end{aligned} \right\}$$

Використовуючи введені раніше позначення  $a_1 = \omega_{\phi} \cdot l_1 / C_2$  і  $a_2 = \omega_{\phi} \cdot l_2 / C_2$ , після перетворення приходимо до рівняння відносно  $\omega_{\phi}$ :

$$tga_1 \cdot ctga_2 = -J_{p2} / J_{p1}.$$

Результати значень нижчих власних частот крутильних коливань для верстатів СБШС-250Н и СБШС-250МН-32 зведені у табл. 3, рис. 4.

З наведених на рис.4 залежностей виходить, що, як і у випадку повздовжніх коливань частоти  $\omega_{\phi}$  зменшуються за нелінійним законом. Найбільше зменшення частот відбувається після приєднання другої штанги. Значення нижчих частот власних крутильних коливань для верстатів СБШС-250Н і СБШ-250МН-32 близькі.

#### 4.2. Поперечні коливання

При нарощуванні поставу власні форми поперечних коливань на ділянках мають вигляд:

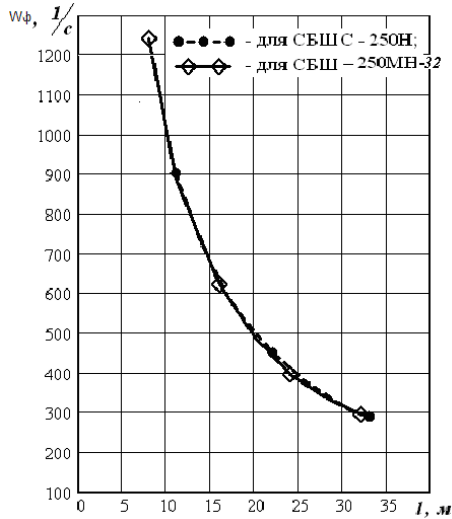
$$X_{yi} = C_{1i} \cdot sh(S_{1i} \cdot x_i) + C_{2i} \cdot ch(S_{1i} \cdot x_i) + C_{3i} \cdot \sin(S_{2i} \cdot x_i) + C_{4i} \cdot \cos(S_{2i} \cdot x_i), \quad (12)$$

де  $i = 1, 2$  – номер ділянки бурової штанги;

Таблиця 3

**Значення нижчих власних частот крутильних коливань**

Тип верстата	Кількість штанг							
	Одна		Дві		Три		Чотири	
	$l, \text{м}$	$\omega_\phi, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_\phi, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_\phi, \text{с}^{-1}$	$l, \text{м}$	$\omega_\phi, \text{с}^{-1}$
СБШС – 250Н	11	902	22	451	33	290	44	186
СБШ-250МН-32	8	1241	16	621	24	396	32	295



**Рис. 4. Залежність значень нижчих частот власних крутильних коливань від довжини бурового поставу**

$$S_{1i} = \sqrt{\sqrt{0,25 \cdot a_i^4 + k_i^4} - 0,5 \cdot a_i^2}, S_{2i} = \sqrt{\sqrt{0,25 \cdot a_i^4 + k_i^4} + 0,5 \cdot a_i^2},$$

$$a_i = \sqrt{R/EJ_i}, k_i = -\sqrt[4]{\omega_p^2 \cdot m_i/EJ_i}.$$

Вираз (12) повинен задовольняти граничним умовам: при  $x_1 = 0$  маємо  $X_{y1} = 0$ ,  $X'_{y1} = 0$  і при  $x_2 = l_2$  маємо  $X_{y2} = 0$ ,  $X'_{y2} = 0$ . (13)

Вираз (2.12) повинен задовольняти також і умовам сполучення. При  $x_1 = l$ ,  $x_2 = 0$  маємо  $X_{y1} = X_{y2}$ ,  $X'_{y1} = X'_{y2}$ , одержимо

$$\left. \begin{aligned} E \cdot J_1 \cdot X''_{y1} &= E \cdot J_2 \cdot X''_{y2}, \\ E \cdot J_1 \cdot X'''_{y1} &= E \cdot J_2 \cdot X'''_{y2}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Після підстановки (2.12) у вирази (2.13) і (2.14) приходимо до системи алгебраїчних рівнянь щодо довільних постійних  $C_{ji}$  ( $j = 1, \dots, 4$ ,  $i = 1, 2$ ):

$$\left. \begin{aligned} C_{21} + C_{41} &= 0; \\ C_{21} \cdot S_{11}^2 - C_{41} \cdot S_{21}^2 &= 0; \\ C_{11} \cdot sh(S_{11} \cdot l_1) + C_{21} \cdot ch(S_{11} \cdot l_1) + C_{31} \cdot sin(S_{21} \cdot l_1) + C_{41} \cdot cos(S_{21} \cdot l_1) - \\ - C_{22} - C_{42} &= 0; \\ C_{11} \cdot S_{11} \cdot ch(S_{11} \cdot l_1) + C_{21} \cdot S_{11} \cdot sh(S_{11} \cdot l_1) - C_{31} \cdot S_{21}^2 \cdot sin(S_{21} \cdot l_1) - \\ - C_{41} \cdot S_{21} \cdot sin(S_{21} \cdot l_1) &= C_{12} \cdot S_{12} + C_{32} \cdot S_{22}; \\ C_{11} \cdot S_{11}^2 \cdot sh(S_{11} \cdot l_1) + C_{21} \cdot S_{11}^2 \cdot ch(S_{11} \cdot l_1) + C_{31} \cdot S_{21} \cdot sin(S_{21} \cdot l_1) - \\ - C_{41} \cdot S_{21}^2 \cdot cos(S_{21} \cdot l_1) &= J_2/J_1 \cdot (C_{22} \cdot S_{12}^2 - C_{42} \cdot S_{22}^2); \\ C_{11} \cdot S_{11}^3 \cdot ch(S_{11} \cdot l_1) + C_{21} \cdot S_{11}^3 \cdot sh(S_{11} \cdot x_1) - C_{31} \cdot S_{21}^3 \cdot cos(S_{21} \cdot l_1) + \\ + C_{41} \cdot S_{21}^3 \cdot sin(S_{21} \cdot l_1) &= \frac{J_2}{J_1} \cdot (C_{12} \cdot S_{12}^3 - C_{32} \cdot S_{22}^3); \\ C_{12} \cdot sh(S_{12} \cdot l_2) + C_{22} \cdot ch(S_{12} \cdot l_2) + C_{32} \cdot sin(S_{22} \cdot l_2) + C_{42} \cdot cos(S_{22} \cdot l_2) &= 0; \\ C_{12} \cdot S_{12} \cdot ch(S_{12} \cdot l_2) + C_{22} \cdot S_{12} \cdot sh(S_{12} \cdot l_2) + C_{32} \cdot S_{22} \cdot cos(S_{22} \cdot l_2) - \\ - C_{42} \cdot S_{22} \cdot sin(S_{22} \cdot l_2) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

де довільні постійні  $C_{21}$ ,  $C_{41}$  враховують взаємодію шарошкового долота і породи, тому при визначенні власних частот поставу вони дорівнюють нулю.

Система рівнянь (15) має рішення тоді, коли визначник дорівнює нулю<sup>6</sup>. Якщо ввести позначення

$$\psi_1 = S_{11} \cdot l_1; \psi_2 = S_{21} \cdot l_1; \psi_3 = S_{12} \cdot l_2; \psi_4 = S_{22} \cdot l_2,$$

то рівняння для визначення власних частот  $\omega_p$  поперечних коливань набуває наступного вигляду:

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_{11}^2 & 0 & -S_{21}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ sh\psi_1 & ch\psi_1 & sin\psi_2 & cos\psi_2 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ S_{11}ch\psi_1 & S_{11}sh\psi_1 & S_{21}cos\psi_2 & -S_{21}sin\psi_2 & -S_{21} & 0 & -S_{22} & 0 \\ S_{11}^2sh\psi_1 & S_{11}^2ch\psi_1 & -S_{21}^2sin\psi_2 & -S_{21}^2cos\psi_2 & 0 & -\frac{J_2}{J_1}S_{12}^2 & 0 & \frac{J_2}{J_1}S_{22}^2 \\ S_{11}^3ch\psi_1 & S_{11}^3sh\psi_1 & -S_{21}^3cos\psi_2 & S_{21}^3sin\psi_2 & -\frac{J_2}{J_1}S_{12}^3 & 0 & \frac{J_2}{J_1}S_{22}^3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & sh\psi_3 & ch\psi_3 & sin\psi_4 & cos\psi_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{12}ch\psi_3 & S_{12}sh\psi_3 & S_{22}cos\psi_4 & -S_{22}sin\psi_4 \end{vmatrix} = 0$$

<sup>6</sup> Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for Scientists and Engineers. Mineola, New York: Dover Publication, Inc., 1968. 325 p.

Кількісні значення власних частот  $\omega_p$  визначались шляхом знаходження чисельного рішення останнього рівняння при заданих параметрах бурового постау (табл.1) ітераційним методом Ньютона.

Буровий постау, як система з розподіленими параметрами, має нескінченну безліч власних частот поперечних коливань. З цього числа для аналізу вибираємо лише ті частоти, значення яких не перевищують частоти 200 1/с (частоти зрізу зовнішнього контуру системи керування). В цю область частот, у залежності від загальної довжини штанги, потрапляють два і більше значення власних частот поперечних коливань.

У табл. 4 зведені значення власних частот поперечних коливань  $\omega_p$  у залежності від зусилля подачі  $R$  і кількості працюючих штанг для верстата СБШС-250Н. Аналогічні значення зведені у табл.5, 6 і 7 для верстата СБШ-250МН-32 при бурінні однією, двома і трьома штангами, відповідно. Аналіз значень, зведених у таблицях, показує, що залежність зусилля подачі  $R$  у порівнянні з впливом довжини бурового постау на величину власних частот коливань, незначна. Тому що довжина постау змінюється дискретно шляхом нагвинчування на першу штангу з більшою товщиною стінок штанг із меншою товщиною стінок, також дискретно змінюється і значення власних частот  $\omega_p$  у розглянутій смузі частот.

Таблиця 4

**Власні частоти поперечних коливань постау верстата  
СБШС-250Н при наросуванні однією штангою (22 м)  
і двома штангами (33 м)**

$l, \text{ м}$	$R, \text{ кН}$	$\omega_p, \text{ с}^{-1}$				
		$\omega_{p1}$	$\omega_{p2}$	$\omega_{p3}$	$\omega_{p4}$	$\omega_{p5}$
22	50	4,670	16,271	35,097	59,505	91,267
	100	4,162	15,780	34,554	58,966	90,718
	150	3,581	15,272	34,003	58,422	90,166
	200	2,882	14,747	33,441	57,873	89,610
	250	1,941	14,201	32,871	57,318	89,051
	300	0,000	13,632	32,289	56,758	88,488
	350	0,000	13,038	31,697	56,192	87,922
33	50	2,486	9,027	19,561	34,188	52,075
	100	1,826	8,487	19,002	33,608	51,498
	150	0,682	7,909	18,426	33,019	50,915
	200	0,000	7,284	17,831	32,418	50,324
	250	0,000	6,599	17,216	31,806	49,727
	300	0,000	5,835	6,577	31,182	49,121
	350	0,000	4,954	15,913	30,545	48,508

Таблиця 5

**Власні частоти поперечних коливань поставу верстата  
СБШ-250МН-32 при нарощуванні однією штангою  
(загальна довжина  $l=16\text{ м}$ )**

$l, \text{ м}$	$R, \text{ кН}$	$\omega_p, \text{ с}^{-1}$	
		$\omega_{p1}$	$\omega_{p2}$
16	50	17,375	64,151
	100	16,950	63,618
	150	16,513	63,079
	200	16,065	62,536
	250	15,603	61,988
	300	15,128	61,435

Таблиця 6

**Власні частоти поперечних коливань поставу верстата  
СБШ-250МН-32 при нарощуванні двома штангами  
(загальна довжина  $l=24\text{ м}$ )**

$l, \text{ м}$	$R, \text{ кН}$	$\omega_p, \text{ с}^{-1}$		
		$\omega_{p1}$	$\omega_{p2}$	$\omega_{p3}$
24	50	17,375	64,151	61,734
	100	16,950	63,618	61,102
	150	16,513	63,079	60,462
	200	16,065	62,536	59,816
	250	15,603	61,988	59,163
	300	15,128	61,435	58,501

Таблиця 7

**Власні частоти поперечних коливань поставу верстата  
СБШ-250МН-32 при нарощуванні трьома штангами  
(загальна довжина  $l=32\text{ м}$ )**

$l, \text{ м}$	$R, \text{ кН}$	$\omega_p, \text{ с}^{-1}$			
		$\omega_{p1}$	$\omega_{p2}$	$\omega_{p3}$	$\omega_{p4}$
32	50	4,657	16,017	60,509	91,378
	100	3,976	15,409	59,827	90,705
	150	3,145	14,774	59,137	90,026
	200	1,984	14,110	58,438	89,343
	250	0,000	13,411	57,730	88,653
	300	0,000	12,672	57,014	87,958

Для верстатів, які досліджуються, характерно, що зі збільшенням кількості штанг спостерігається зближення значень власних частот поперечних коливань, зменшуються проміжки між ними, особливо в

області частот  $\omega < 50$  1/с. Значення нижчих власних частот не зберігаються при нарощуванні поставу.

## ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних досліджень поставу як об'єкту керування, що є стрижнем кільцевого поперечного перерізу, який піддається осьовому тиску і крутінню, можна зробити наступні висновки:

1. У процесі буріння у поставі збуджуються складні поперечні, повздовжні, крутильні коливання. При нарощуванні бурового поставу нижчі частоти власних повздовжніх, крутильних і поперечних коливань істотно зменшуються:

– для верстата СБШ-250МН-32 повздовжні коливання – від значення 981 1/с до 700 1/с (у 1,4 рази), крутильні – від 1241 1/с до 902 1/с (у 1,37 рази), поперечні – від 65 1/с до 35 1/с (у 1,85 рази);

– для верстата СБШС-250Н повздовжні коливання – від значення 272 1/с до 187 1/с (у 1,45 рази), крутильні – від 295 1/с до 186 1/с (у 1,58 рази), поперечні – від 12,62 1/с до 4,95 1/с (у 2,54 рази).

Характер залежності цих частот від довжини штанги – нелінійний.

2. Зі збільшенням зусилля подачі частота поперечних коливань знижується, однак у всьому діапазоні зміни зусилля подачі її величина змінюється не більше ніж на 6%.

3. Із зіставлення власних частот повздовжніх, поперечних і крутильних коливань, отриманих розрахунковим шляхом та власними частотами, що виділені при експериментальних дослідженнях, виходить, що при бурінні однією і двома штангами власні частоти поставу не потрапляють у смугу пропускання системи керування. При бурінні трьома штангами з'явилися власні низькочастотні поперечні коливання поставу у верстаті СБШ-250МН-32. Експериментальне значення циклічної частоти коливань – 2,36 Гц, розрахункове – 2,48 Гц, що відповідає кутовій частоті коливань 15,603 1/с. Відносна похибка обчислення циклічної частоти  $(2,48 - 2,36) / 2,48 * 100\% = 4,8\%$ .

4. При бурінні трьома штангами (верстат СБШС-250Н) експериментально зафіксовані власні низькочастотні поперечні коливання штанги з циклічною частотою 1,02 Гц. Розрахункове значення цієї частоти – 1,05 Гц, що відповідає кутовій частоті 6,599 1/с. Відносна похибка обчислення частоти складає  $(1,05 - 1,02) / 1,05 * 100\% = 2,8\%$ .

5. Приводні системи постійного і змінного струмів налаштовуються зі смугою пропускання зовнішнього контуру до 50 1/с і 200 1/с відповідно, тому крутильні коливання при бурінні однією і двома штангами не потрапляють в смугу пропускання системи регулювання. Збільшення смуги пропускання зовнішнього контуру системи керування

приводної системи і зменшення власних частот пружних коливань поставу при бурінні трьома і більшою кількістю штанг, призведе до впливу на перехідні процеси крутильних коливань бурового поставу.

6. Безпосередньо на динаміку приводної системи змінного струму крутильні коливання поставу впливають за умови, що його власні частоти потрапляють у смуги пропускання поперечної складової струму статора або контурів поперечної складової струму статора і контуру частоти обертання.

7. Безпосередньо низькочастотні складові поперечних і повздовжніх коливань не вплинуть на динамічні процеси у приводній системі. Однак власні низькочастотні поперечні коливання призведуть до неприпустимих вібрацій не тільки поставу, але і бурового верстата у цілому, що істотно знизить напрацювання на відмовлення конструктивних вузлів БВ і обмежить його продуктивність. Зі збільшенням довжини бурової штанги значення власних частот поперечних і повздовжніх коливань для досліджуваних верстатів зближаються і переміщуються в область більш низьких величин. Значення власних частот не зберігаються при зміні довжини поставу у процесі його збирання – розбирання.

8. Застосування приводної системи постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги і смугою пропускання контуру швидкості не більше ніж 50 рад/с у верстатах СБШС-250Н и СБШ-250МН-32 не призводить до потрапляння у смугу пропускання власних частот бурового поставу.

9. Застосування приводної системи змінного струму з транзисторним широтно-імпульсним інвертором напруги і смугою пропускання контуру швидкості не менше 200 рад/с у верстатах СБШС-250Н, призведе до потрапляння у смугу пропускання контуру частоти обертання і струму статора найнижчої власної частоти крутильних коливань поставу при бурінні чотирма штангами.

## **АНОТАЦІЯ**

Впровадження сучасних швидкодіючих приводних систем змінного струму з мало інерційними асинхронними двигунами у бурових верстатах нового покоління потребує брати до уваги динамічні властивості бурового поставу. Проаналізовані динамічні властивості бурового поставу як об'єкта керування. Встановлено, що при бурінні поставом з трьома і більше штангами кутові частоти власних крутильних коливань у верстатах СБШС-250Н становлять менше 186 1/с і потрапляють у смугу пропускання транзисторної приводної системи змінного струму з частотою зрізу зовнішнього контуру керування 200 1/с, що суттєво погіршує показники якості керування електромеханічної



системи. Такі коливання доцільно компенсувати засобами керування приводної системи. Визначено, що у режимах буріння повністю зібраним поставом довжиною 33 м у верстатах СБШС-250Н генеруються поперечні власні низькочастотні коливання з циклічною частотою 1,05 Гц (для верстата СБШ-250МН-32 – 2,48 Гц при довжині поставу 24 м), які безпосередньо не впливають на динаміку роботи приводної системи, але призводять до появи додаткових навантажень на вузли бурових верстатів, подавлення яких можливо тільки шляхом зменшення частоти обертання поставу, що веде до зниження продуктивності гірських робіт.

### **Література**

1. Abu-Mahfouz, I. Drilling wear detection and classification using vibration signals and artificial neural network. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(7), 2003. 707-720. doi: [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(03\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(03)00023-3)
2. Arvajah, T., & Ismail, F. Machining stability in high-speed drilling–Part 1: Modeling vibration stability in bending. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12), 2006. 1563-1572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.09.018>
3. Ema, S., & Marui, E. Theoretical analysis on chatter vibration in drilling and its suppression. *Journal of Materials Processing Technology*, 138(1), 2003. 572-578. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00148-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00148-1).
4. Lee, B. Y., Liu, H. S., & Tarng, Y. S. Modeling and optimization of drilling process. *Journal of Materials Processing Technology*, 74(1), 1998. 149-157. doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00263-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00263-X).
5. Mehrabadi, I. M., Nouri, M., & Madoliat, R. Investigating chatter vibration in deep drilling, including process damping and the gyroscopic effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(12), 2009. 939-946. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.009>.
6. Korn G., Korn T. *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. Mineola, New York: Dover Publication, Inc., 1968. 832 p.

### **Information about the author:**

**Khilov Victor Sergiiovych,**

Doctor of Technical Sciences,

Professor at the Department of Electrical and Robotic Systems Automation  
LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

# 03

## CHAPTER

**Intelligent control  
systems, robotic  
and mechatronic  
systems**

## АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Койфман О. О., Мірошниченко В. І., Сімкін О. І.

### ВСТУП

В умовах промислового виробництва виникає потреба в періодичному налагодженні та налаштуванні систем автоматичного керування, спричинена поступовими змінами експлуатаційних характеристик керованого технологічного агрегату в процесі його функціонування. Наприклад, знос футерування робочого простору нагрівальної печі призводить до збільшення втрати теплоти, яке, у свою чергу, безпосередньо впливає на оптимальне керування температурним режимом в зонах. Ці зміни повинні бути враховані періодичним налаштуванням регуляторів відповідних технологічних параметрів. Сучасні локальні системи автоматичного регулювання обладнані переважно контролерами та програмними засобами з функцією налаштування регуляторів в автоматичному режимі, що дозволяє персоналу не заглиблюватись у ідентифікацію об'єктів керування. Недоліком цього способу є суттєва тривалість обчислень та забезпечення працездатності системи лише у вузькому діапазоні регулювання. Незважаючи на широке, зумовлене зручністю для персоналу, використання автоматичного налаштування промислових регуляторів, залишається багато невирішених проблем, пов'язаних з якістю налаштування системи регулювання, зміною параметрів об'єктів керування та зовнішніх збурень в процесі ідентифікації, а також забезпеченням потрібних показників якості процесів регулювання<sup>1</sup>.

Ідентифікація об'єктів керування (ОК) передбачає визначення параметрів, що характеризують їхні основні динамічні властивості, які є важливими з точки зору керування технологічними процесами, наприклад, інерційність та час реагування для статичних об'єктів із самовирівнюванням.

Найпоширенішим експериментом для налагодження систем автоматичного керування, зокрема, ідентифікації об'єкта керування, є отримання його реакції на вхідний ступінчастий вплив – кривої розгону

---

<sup>1</sup> Шпарук Б. О., Полішук І. А. Адаптивне керування інерційними квазістаціонарними об'єктами. Молодий вчений. 2017. № 4. С. 577–582. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/135.pdf>.

(КР), що використовується для визначення моделі ОК в технологічних умовах у межах амплітуди кроку<sup>2</sup>.

Метою цього дослідження є аналіз методів ідентифікації ОК для визначення універсального методу, що дозволить отримати в комплексі: мінімальну статичну похибку моделювання розімкнутої системи автоматичного керування, максимальне значення коефіцієнта детермінації моделі, а також забезпечити відповідність тривалості перехідного процесу в розімкнутій системі автоматичного керування вимогам технологічного процесу.

## 1. Аналіз методів ідентифікації об'єктів керування

### 1.1 Огляд методів визначення параметрів об'єктів керування

Аналіз вітчизняних і закордонних джерел дозволяє розділити методи визначення параметрів ОК на наступні групи:

#### 1.1.1 Інженерні методи

Інженерні методи передбачають: визначення точки А, в якій швидкість зміни регульованого параметру є максимальною; побудову дотичної в цій точці перегину та графічне визначення декількома способами значень параметрів<sup>3</sup> ОК як аперіодичної (інерційної) ланки першого порядку (рис. 1, а, б) з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{T_{об}p+1}, \quad (1)$$

а також аперіодичної (інерційної) ланки другого порядку (рис. 2) з передавальною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}, \text{ при } T_1 > 2T_2, \quad (2)$$

або

$$W(p) = \frac{K}{(T_3 p + 1) \cdot (T_4 p + 1)}, \quad T_{3,4} = \frac{T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4T_2^2}}{2}, \quad (3)$$

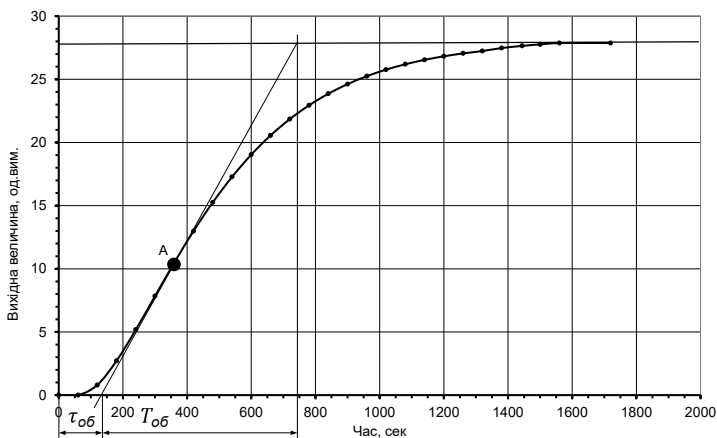
де  $K$  – коефіцієнт передачі об'єкта керування;

$T_{об}, T_1, T_2, T_3, T_4$  – постійні часу об'єкта керування.

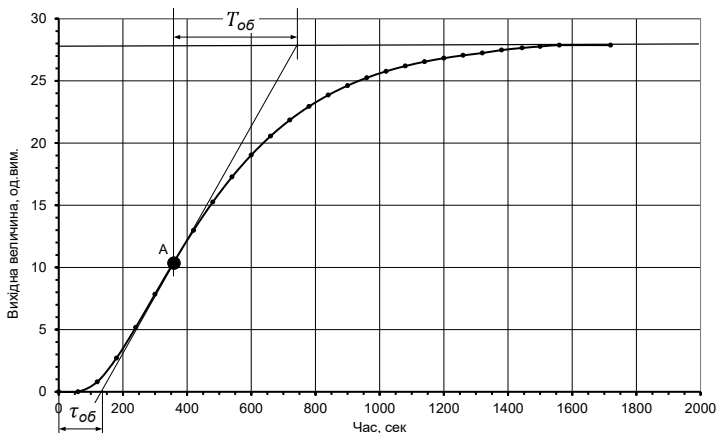
---

<sup>2</sup> Lipták B. G. Instrument engineers' handbook. 4th ed. CRC Press, 2018. Vol. 2 : Process control and optimization. 2464 p.

<sup>3</sup> Rengaswamy R., Srinivasan B., Bhatt N. P. Process Control Fundamentals. CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9780367433437>.



а)



б)

**Рис. 1. Інженерні методи ідентифікації ОК:**

**а) Методи 10 та 11, б) Методи 20 та 21**

В цьому дослідженні прийняті позначення: Метод 10, Метод 20, Метод 30, відповідно, до вищевказаних інженерних методів за умов визначення точки перегину в автоматичному режимі, а також Методи 11, 21, 31 – визначення точки перегину вручну за допомогою графічного способу обробки результатів експерименту.

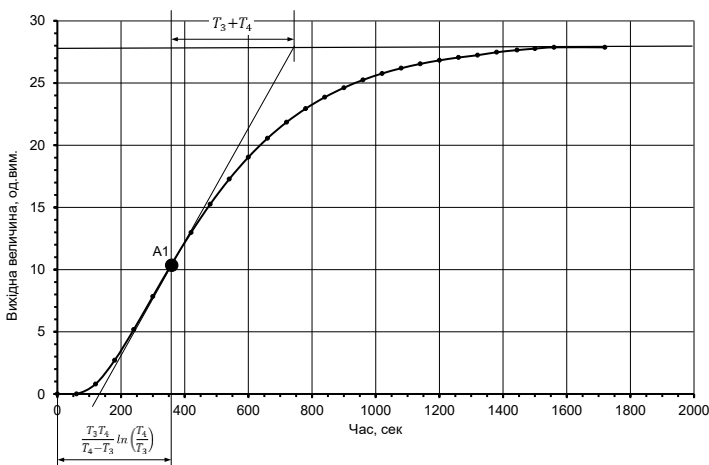


Рис. 2. Інженерні методи ідентифікації ОК: Методи 30 та 31

### 1.1.2 Методи визначення реакції об'єкта в одній або двох точках

– Метод точки 0,632 (Метод 60, рис. 3) рекомендовано використовувати для ідеального випадку, коли криву розгону ОК можна описати тільки експоненціальною функцією, тобто апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку без запізнення ( $\tau_{об} = 0$ ). Значення постійної часу  $T_{об}$  визначається як час, за який вихідна величина досягне 63,2% від нового сталого значення.

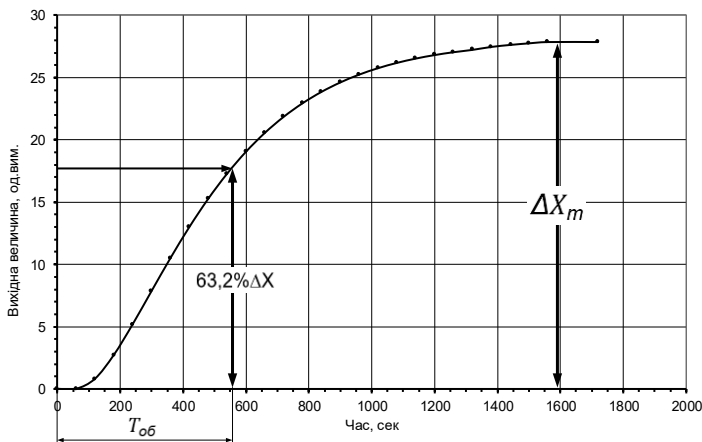


Рис. 3. Метод 60

– Метод точок 0,1..0,15 та 0,8..0,85 (Метод 40, рис. 4) передбачає визначення на графіку кривої розгону часових координат двох точок за формулами:

$$\tau_1 = (0,1 \dots 0,15) T, \quad (4)$$

$$\tau_2 = (0,8 \dots 0,85) T, \quad (5)$$

де  $T$  – час, за який вихідна величина досягла нового сталого значення.

Відповідно визначаються координати по осі ординат для обох точок:

$$X(\tau_1) = (0,1 \dots 0,15) \Delta X_T, \quad (6)$$

$$X(\tau_2) = (0,8 \dots 0,85) \Delta X_T, \quad (7)$$

де  $\Delta X_T$  – різниця між сталими значеннями параметру ОК.

За отриманими координатами обчислюють відносні ординати точок:

$$X_1 = \frac{X(\tau_1) - X(0)}{\Delta X_T}, \quad (8)$$

$$X_2 = \frac{X(\tau_2) - X(0)}{\Delta X_T}, \quad (9)$$

де  $X(0)$  – початкове стає значення параметру ОК.

Параметри об'єкта керування обчислюють за виразами:

$$\tau_{об} = \frac{\tau_2 \ln(1 - X_1) - \tau_1 \ln(1 - X_2)}{\ln(1 - X_1) - \ln(1 - X_2)} \quad (10)$$

$$T_{об} = \frac{\tau_{об} - \tau_1}{\ln(1 - X_1)} \quad (11)$$

або

$$T_{об} = \frac{\tau_{об} - \tau_2}{\ln(1 - X_2)} \quad (12)$$

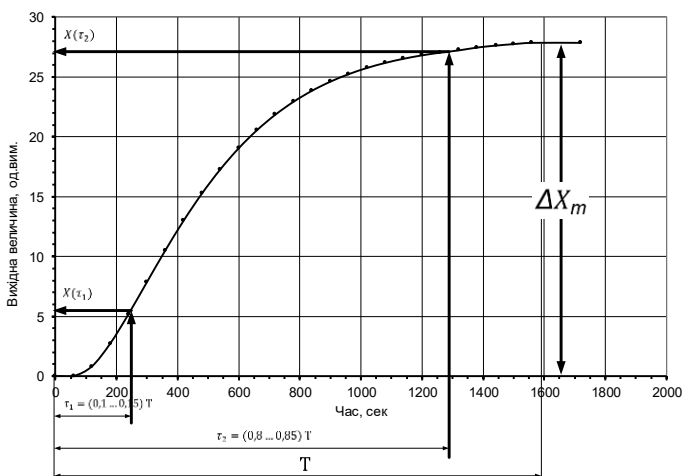
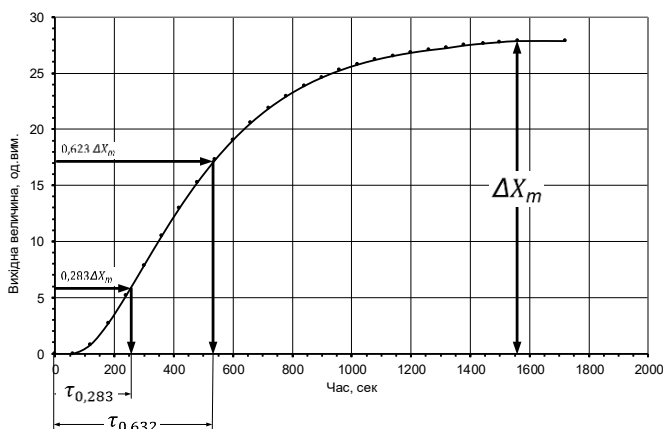


Рис. 4. Метод 40

– Метод точок 0,283 та 0,632 (Метод 61, рис. 5) передбачає алгоритм визначення постійної часу та часу запізнення, який застосовують практично для усіх хімічних процесів [2]. На першому етапі для ординат  $0,283 \cdot \Delta X_T$  та  $0,623 \cdot \Delta X_T$  необхідно визначити координати по осі часу  $\tau_{0,283}$  та  $\tau_{0,632}$ . На часовій шкалі ці дві точки є моментами, коли регульований параметр досягає 28,3 і 63,2% свого остаточного значення в стаціонарному стані. На другому етапі постійна часу та час запізнення розраховуються за наступними формулами:

$$T_{об} = \frac{3}{2} (\tau_{0,632} - \tau_{0,283}) \quad (13)$$

$$\tau_{об} = \tau_{0,632} - T_{об} \quad (14)$$



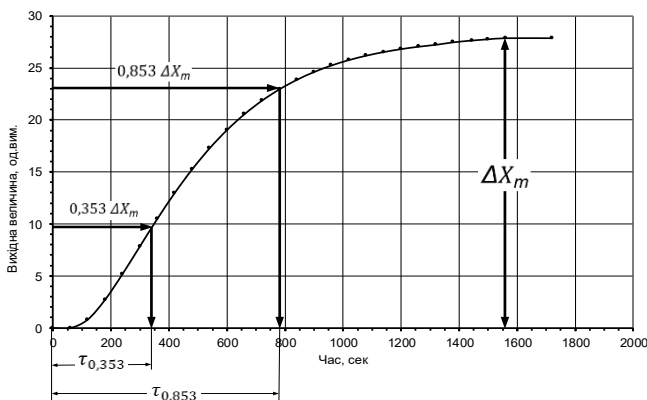
**Рис. 5. Метод 61**

– Метод точок 0,353 та 0,853 (Метод 62, рис. 6) дозволяє апроксимувати дані кривої розгону ОК (апериодичної ланки другого та вищого порядку) за допомогою передатної функції апериодичної ланки першого порядку із запізненням [3]. Алгоритм передбачає на першому етапі визначення координат по осі часу  $\tau_{0,353}$  та  $\tau_{0,853}$  для координат по осі ординат  $0,353 \Delta X_T$  та  $0,853 \Delta X_T$ . На другому етапі параметри розраховуються за наступними виразами:

$$T_{об} = 0,675 (\tau_{0,853} - \tau_{0,353}), \quad (15)$$

$$\tau_{об} = 1,294 \cdot \tau_{0,353} - 0,294 \cdot \tau_{0,853}. \quad (16)$$





**Рис. 6. Метод 62**

– Метод точок 0,25 та 0,75 (Метод 63, рис. 7)<sup>4</sup> використовується для визначення параметрів лінійних інваріантних систем<sup>5</sup>, до яких можна віднести різноманітні технічні системи (електричні, механічні, термодинамічні тощо) та які описуються аперіодичною ланкою другого порядку. На першому етапі алгоритму необхідно визначити часові мітки, де регульований параметр досягає 25% і 75% від значення в стаціонарному стані. На другому кроці необхідно обчислити постійні часу  $T_1$  та  $T_2$  для аперіодичної ланки другого порядку:

$$T_2 = \frac{t_{75} - t_{25}}{X(1+1/P)}, \quad (17)$$

$$T_1 = \frac{T_2}{P}, \quad (18)$$

де

$$X = 14,2797 \cdot r^3 - 9,3891 \cdot r^2 + 0,25437 \cdot r + 1,32148,$$

$$r = \frac{t_{25}}{t_{75}},$$

$$P = -18,56075 \cdot r + \frac{0,57311}{r - 0,20747} + 4,16423,$$

<sup>4</sup> Identification of a damped PT2 system. URL: <https://hackaday.io/page/4829-identification-of-a-damped-pt2-system>

<sup>5</sup> Lineares zeitinvariantes System. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares\\_zeitinvariantes\\_System](https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares_zeitinvariantes_System)

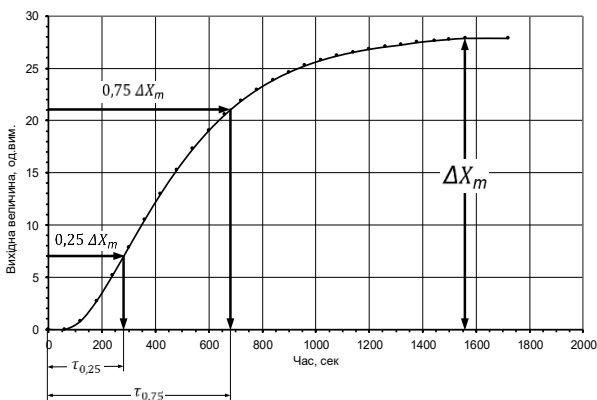


Рис. 7. Метод 63

### 1.1.3 Апроксимація кривої розгону

Методи (70 та 71) передбачають апроксимацію кривої розгону ОК рівнянням кривої розгону аперіодичної ланки першого з запізненням:

$$x(\tau) = K_{об} \left( 1 - e^{-\frac{\tau - \tau_{об}}{T_{об}}} \right), \quad (19)$$

із визначенням  $K_{об}$  та із наперед заданим значенням  $K_{об}$  відповідно.

Методами (80 та 81) аналогічно апроксимують криву розгону ОК рівнянням кривої розгону аперіодичної ланки другого порядку:

$$x(\tau) = K_{об} \left( 1 - \frac{1}{T_3 - T_4} \left( T_3 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_3}} - T_4 \cdot e^{-\frac{\tau}{T_4}} \right) \right), \quad (20)$$

із визначенням  $K_{об}$  та із наперед заданим значенням  $K_{об}$  відповідно.

### 1.1.4 Бібліотеки Python для розв'язування задач керування

Алгоритм<sup>6,7</sup>, реалізований у відкритій бібліотеці Python, потребує додатково аналізу та реалізації надання інформації в необхідній формі.

### 1.1.5 Визначення параметрів ОК з використанням нейронної мережі для емуляції кривої розгону

Отримання результатів обробки емульованої нейронною мережею кривої розгону потребує більшої кількості вибірок експериментальних даних для одного об'єкту керування.

<sup>6</sup> Fitting step responses. URL: [https://dynamics-and-control.readthedocs.io/en/latest/1\\_Dynamics/7\\_System\\_identification/Dynamic\\_model\\_parameter\\_estimation.html](https://dynamics-and-control.readthedocs.io/en/latest/1_Dynamics/7_System_identification/Dynamic_model_parameter_estimation.html)

<sup>7</sup> A Python library for solving textbook control problems. URL: <https://github.com/alchemyst/Dynamics-and-Control>

## 2. Алгоритм та результати дослідження на прикладі однієї кривої розгону

У цьому дослідженні наведено результати використання вказаних в пп. 1.1.1 – 1.1.3 методів без розгляду особливостей реалізації кожного з них для п'ятдесяти п'яти емпірично отриманих кривих розгону технологічних процесів, які можна представити об'єктом керування з самовирівнюванням, наприклад, регулювання температури або тиску у зоні нагрівальної печі, загальної витрати газу на опалення агрегату тощо.

### 2.1 Алгоритм обробки кривих розгону

Крок 1. Отримання параметрів  $K_{об}$ ,  $\tau_{об}$  та  $T_{об}$  або  $T_1$  та  $T_2$  (або  $T_3$  та  $T_4$ ) кожним з наведених у попередньому розділі методів.

Коефіцієнт посилення  $K_{об}$  визначається стандартно за виразом:

$$K_{об} = \frac{\Delta X_r}{\Delta Y}, \quad (21)$$

де  $\Delta X_r$  – зміна вихідної величини;

$\Delta Y$  – амплітуда ступінчастої зміни вхідної величини.

Або може визначатися як результат апроксимації.

Крок 2. Імітаційне моделювання в пакеті Xcos (Scilab) кривої розгону аперіодичної ланки першого порядку без запізнення (рис. 8), аперіодичної ланки першого порядку із запізненням (рис. 9) та аперіодичної ланки другого порядку (рис. 10).

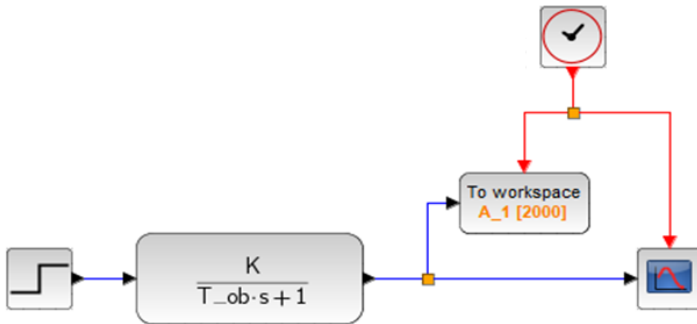


Рис. 8. Модель аперіодичної ланки першого порядку без запізнення

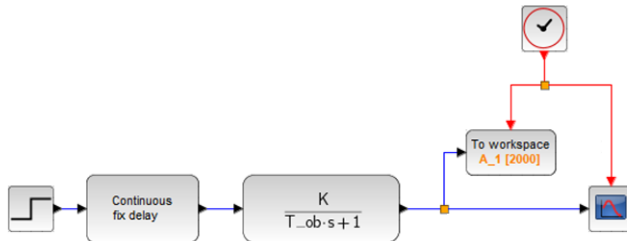
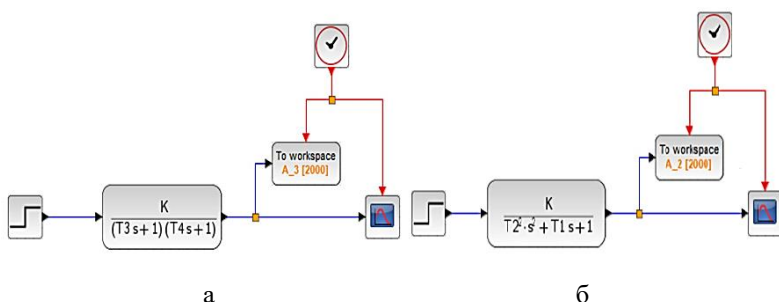


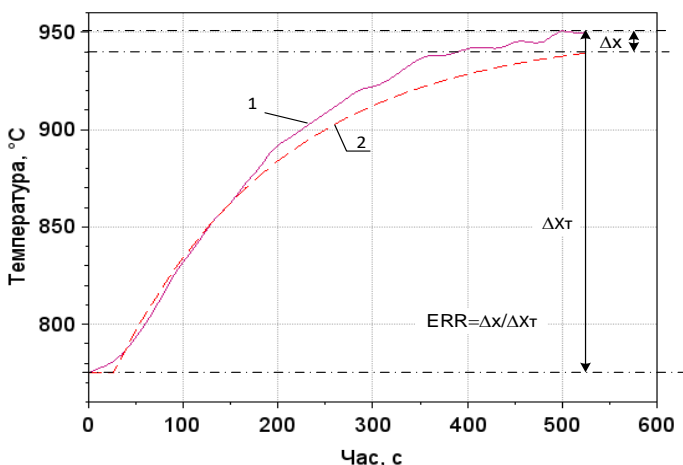
Рис. 9. Модель аперіодичної ланки першого порядку з запізненням



**Рис. 10. Модель аперіодичної ланки другого порядку:**  
**а) із використанням констант T3 та T4; б) із використанням**  
**констант T1 та T2**

Крок 3. Визначення коефіцієнта детермінації  $R^2$  ( $R^2$ ).

Крок 4. Визначення відносної статичної похибки моделювання ERR, що характеризує залишкове відхилення параметра при досягненні сталого значення (рис. 11). Для інженерних розрахунків в галузі автоматизації виробничих процесів прийнято допустимий розмір похибки до 0,05.



**Рис. 11. Відносна статична похибка моделювання ERR**

Крок 5. Порівняння результатів, отриманих різними методами визначення параметрів.

Наведений алгоритм було реалізовано в середовищі комп'ютерної математики Scilab<sup>8</sup>, яке одночасно надає можливість програмування розробленого алгоритму, виведення інформації в зручній для подальшої обробки результатів формі, імітаційного моделювання з використанням вбудованих можливостей додатку Xcos.

## 2.2 Приклад реалізації алгоритму для однієї кривої розгону

На рис. 12 наведено криву розгону температурного режиму в зоні нагрівальної печі за умови вхідного впливу  $\Delta Y = 20\%$  ХРО.

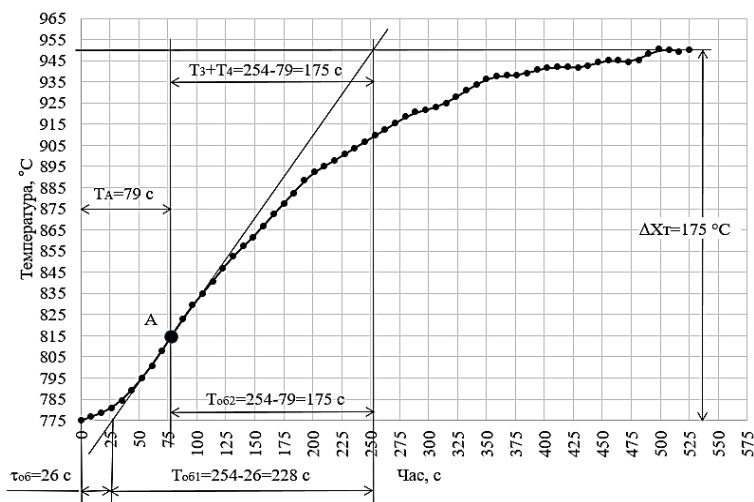


Рис. 12. Крива розгону по даним варіанта 24

### 2.2.1 Результати моделювання кривої розгону

#### Методами 10/11, 20/21, 30/31

Геометричним способом визначені наступні параметри ОК (рис. 11):

Метод 11:  $K_{06} = 8,75$  °C/%ХРО,  $\tau_{06} = 26$  с,  $T_{06} = 228$  с;

Метод 21:  $K_{06} = 8,75$  °C/%ХРО,  $\tau_{06} = 26$  с,  $T_{06} = 175$  с;

Метод 31: Використовуючи рішення системи рівнянь (рис. 1, в):

$$\begin{cases} T_3 + T_4 = 175 \\ \frac{T_3 \cdot T_4}{T_3 - T_4} \ln \frac{T_3}{T_4} = 79 \end{cases}$$

визначено  $K_{06} = 8,75$  °C/%ХРО,  $T_3 = 120,4$  с,  $T_4 = 54,59$  с.

<sup>8</sup> Scilab URL: <https://www.scilab.org/>

За теоремою Вієта обчислені коефіцієнти  $T_1$  та  $T_2$ :

$$T_2 = \sqrt{T_3 \cdot T_4} = 81,1 \text{ с}, T_1 = T_2^2 \left( \frac{1}{T_3} + \frac{1}{T_4} \right) = 175 \text{ с}.$$

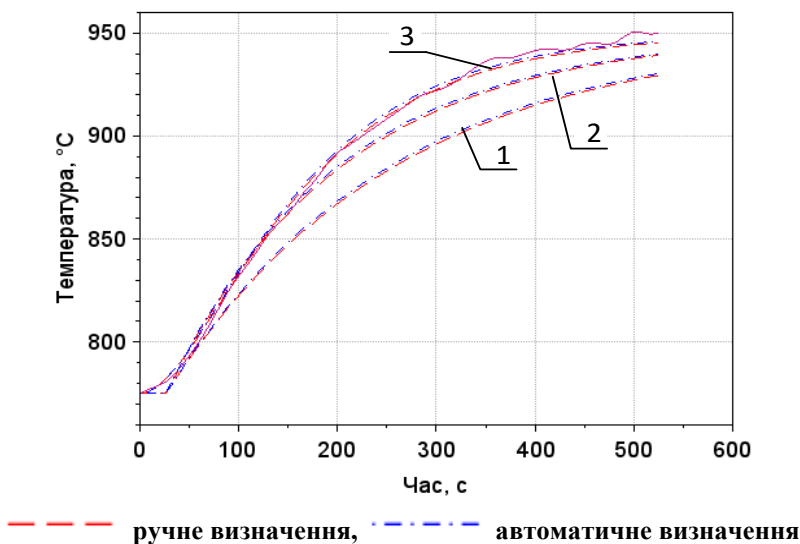
Очевидно, що виконується умова  $T_1 > 2T_2$  для аперіодичної ланки другого порядку.

Також було реалізовано автоматичне визначення точки перегину, побудова дотичної та отримання параметрів об'єкту для інженерних методів 10, 20, 30. Результати наведені в табл.1 та на рис. 13.

Таблиця 1

**Параметри ОК, визначені методами 10/11, 20/21, 30/31**

Автоматичне визначення				Ручне визначення			
$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2	$\tau_{об}$	$T_{об}$	ERR	R2
Метод 10/11							
24,81 с	232,8 с	0,112	0,8507	26 с	228 с	0,1172	0,8351
Метод 20/21							
24,81 с	178,8 с	0,0576	0,9754	26 с	175 с	0,0613	0,9705
Метод 30/31							
$T_3$	$T_4$	ERR	R2	$T_3$	$T_4$	ERR	R2
126,61 с	52,26 с	0,0229	0,9975	120,4 с	54,59 с	0,0265	0,9976
$T_1$	$T_2$	ERR	R2	$T_1$	$T_2$	ERR	R2
178,87 с	81,34 с	0,0265	0,9976	175 с	81,1 с	0,0265	0,9976



**Рис. 13. Результати моделювання:**

**1 – Методи 10/11; 2 – Методи 20/21; 3 – Методи 30/31**

Як видно з наведених результатів (рис. 13, табл. 1), найменшу похибку дають Методи 30/31. Моделювання аперіодичною ланкою другого порядку (Метод 30) дає найкращий збіг в період запізнення реакції об'єкта керування.

### 2.2.2 Результати моделювання кривої розгону Методом 60

На рис. 14 та в табл. 2 наведено результати Методу 60.

Табл. 2. Результати визначення параметрів ОК Методом 60

Параметр	Ручне визначення	ERR	R2
$\tau_{об}$	0	0,0658	0,936
$T_{об}$	192,5		

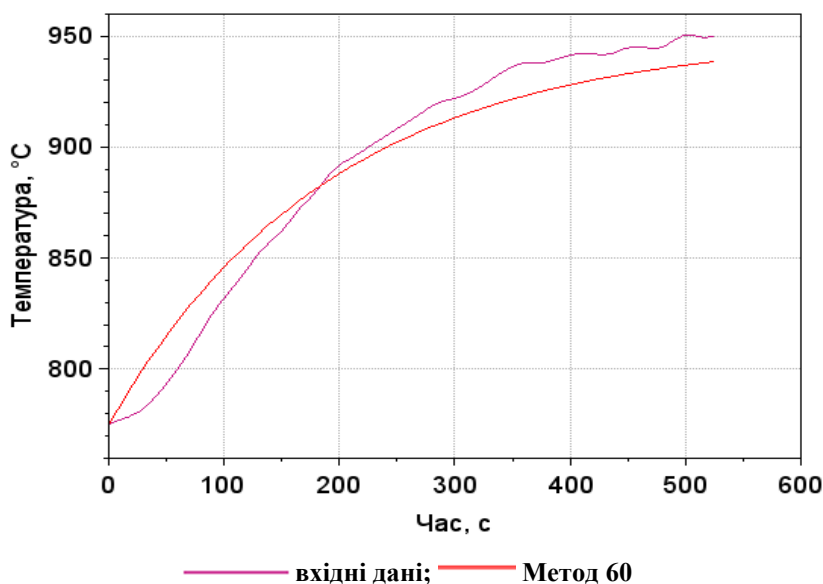


Рис. 14. Результати моделювання Методом 60

Як видно з наведених результатів (рис. 14 та табл. 2), при моделюванні кривої розгону Методом 60 отримані незадовільні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 за повної невідповідності графіків через відсутність в змодельованих результатах часу запізнення.

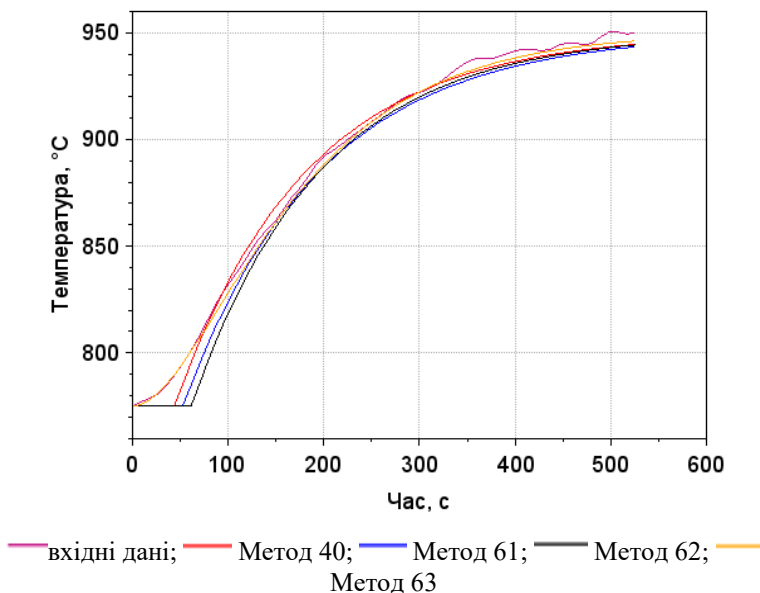
### 2.2.3 Результати моделювання кривої розгону Методами 40, 61, 62, 63

На рис. 15 та в табл. 3 наведено результати моделювання кривої розгону методами двох точок.

Таблиця 3

**Результати визначення параметрів ОК Методами 40, 61, 62, 63**

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 40			
$\tau_{об}$	43,018	0,0311	0,9937
$T_{об}$	139,05		
Метод 61			
$\tau_{об}$	48,125	0,0376	0,9859
$T_{об}$	144,38		
Метод 62			
$\tau_{об}$	54,582	0,0327	0,981
$T_{об}$	135,84		
Метод 63			
$T_1$	76,986	0,021	0,998
$T_2$	105,05		



**Рис. 15. Результати моделювання методами двох точок**



Як видно з наведених результатів (рис. 14, табл. 3) моделювання кривої розгону з використанням параметрів, визначених Методом 63, що передбачає застосування аперіодичної ланки другого порядку, знову дає кращий збіг в момент запізнення реакції ОК.

#### **2.2.4 Результати моделювання кривої розгону Методами 70 та 71**

На рис. 16 та в табл. 4 наведено результати моделювання з використанням Методів 70/71, тобто апроксимації кривої розгону відповідним рівнянням аперіодичної ланки першого порядку із запізненням за формулою (19).

З використанням вбудованої функції datafit<sup>9</sup> для нелінійної обмеженої параметричної апроксимації вимірних даних було реалізовано два варіанти апроксимації: Методом 70 визначаються три параметри об'єкту керування:  $K_{об}$ ,  $\tau_{об}$ ,  $T_{об}$ ; Методом 71 визначаються тільки час запізнення  $\tau_{об}$  та постійна часу  $T_{об}$ , коефіцієнт посилення  $K_{об}$  визначається стандартним способом.

Таблиця 4

**Результати моделювання кривої розгону з параметрами,  
визначеними Методами 70 та 71**

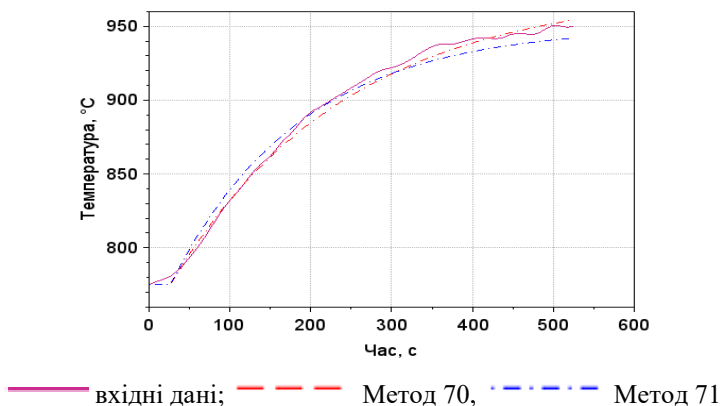
Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 70			
$K_{об}$	9,978	-0,0252	0,995
$\tau_{об}$	19,424		
$T_{об}$	217,695		
Метод 71			
$K_{об}$	8,750	0,0448	0,986
$\tau_{об}$	23,508		
$T_{об}$	160,902		

За результатами моделювання методом 70 отримали від'ємне значення відносної статичної похибки ERR, хоча за абсолютним значенням воно відповідає вимогам щодо точності (<0,05).

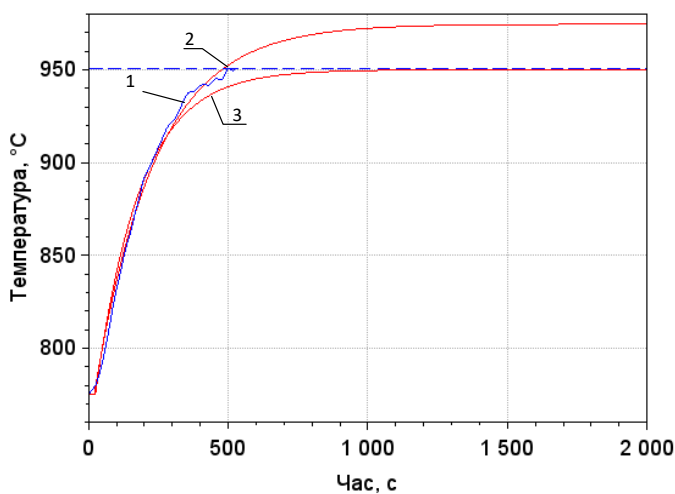
Також слід відмітити, що визначене в результаті апроксимації значення коефіцієнта підсилення ОК перевищує визначене стандартним способом. Отже можна передбачити, що змодельована з цими параметрами ОК крива розгону не досягне сталого значення за відведений час. Для перевірки цієї гіпотези були змодельовані криві розгону із значеннями параметрів, визначеними методами 70 та 71, тривалістю 2000 с (рис. 17). Як можна бачити, крива розгону ОК з параметрами, визначеними методом 71, досягне сталого значення за

<sup>9</sup> Datafit. URL: [https://help.scilab.org/docs/2023.1.0/en\\_US/datafit.html](https://help.scilab.org/docs/2023.1.0/en_US/datafit.html)

відсутності статичної похибки в момент часу 1100 с, замість тривалості вихідного експерименту 525 с. В той час як крива з параметрами за методом 70 стабілізується при 1300 с зі статичною похибкою у 0,14. Результати моделювання ставлять під сумнів коректність проведення експерименту по зняттю кривої розгону нагрівального пристрою, зокрема, визначеною тривалості експерименту.



**Рис. 16. Результати моделювання Методами 70 та 71**



1 – вхідні дані, 2 – Метод 70, 3 – Метод 71

**Рис. 17. Результати моделювання реакції ОК з параметрами, що визначені Методами 70 та 71, продовж 2000 с**

### 2.2.5 Результати моделювання кривої розгону Методами 80 та 81

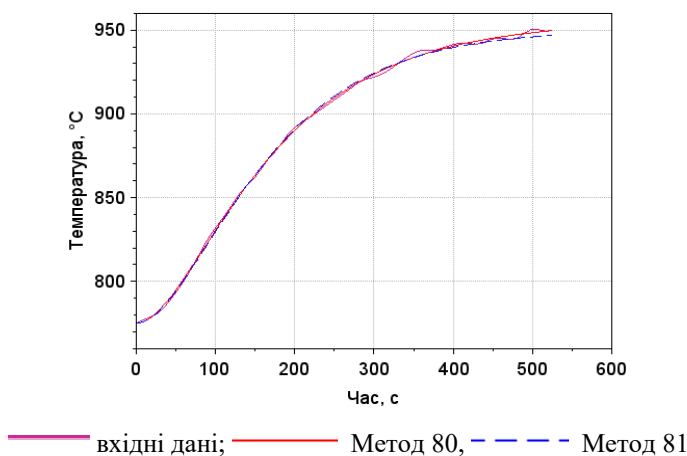
На рис. 18 та в табл. 5 наведено результати моделювання з використанням Методів 80 та 81, тобто апроксимації кривої розгону відповідним рівнянням аперіодичної ланки другого порядку за формулою (20).

Аналогічно експерименту з Методами 70 та 71 було реалізовано два варіанти апроксимації: Методом 80 визначені три параметри:  $K_{об}$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ; Методом 81 визначені тільки параметри  $T_3$ ,  $T_4$ ;  $K_{об}$  визначається стандартним способом.

Таблиця 5

**Результати моделювання кривої розгону з параметрами, визначеними Методами 80 та 81**

Параметр	Автоматичне визначення	ERR	R2
Метод 80			
$K_{об}$	8,882	-0,009307	0,999389
$T_3$	67,385		
$T_4$	114,785		
Метод 81			
$K_{об}$	8,750	0,003374	0,999389
$T_3$	88,185		
$T_4$	88,181		



**Рис. 18. Результати моделювання з використанням Методів 80 та 81**

З наведених результатів можна бачити достатньо високий рівень відповідності змодельованих кривих розгону експериментальним даним.

### 3. Аналіз результатів дослідження вибірки кривих розгону

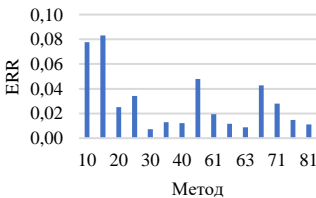
#### 3.1 Середні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону

В табл. 6 та на рис. 19 наведені середні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделюванням у додатку XCOS.

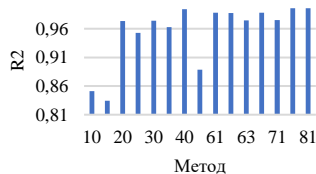
Таблиця 6

**Середні значення похибки ERR та коефіцієнта R2 для всієї вибірки**

№	Метод															min	max
	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81		
ERR	0,079	0,08	0,026	0,035	<b>0,008</b>	0,014	0,013	0,050	0,02	0,01	0,010	0,042	0,029	0,013	0,013	<b>0,008</b>	<b>0,084</b>
R2	0,848	0,83	0,973	0,955	0,982	0,970	0,993	0,897	0,99	0,99	0,983	0,987	0,975	<b>0,996</b>	0,994	<b>0,831</b>	<b>0,996</b>



а)



б)

**Рис. 19. Середні значення: а) відносної статичної похибки ERR; б) коефіцієнта детермінації R2 по всім варіантам кривих розгону**

Проаналізувавши табл. 6, можна зробити висновок, що за допомогою методу 11 отримано незадовільні результати – максимальні із середніх значення похибки та мінімальні із середніх значення коефіцієнта детермінації. Мінімальне із середніх значення відносної статичної похибки моделювання забезпечує ідентифікація ОК з використанням методу 30, але при цьому наявне порівняно низьке середнє значення коефіцієнта детермінації R2. Максимальне із середніх значення коефіцієнта R2 забезпечує використання методів 80 та 81.

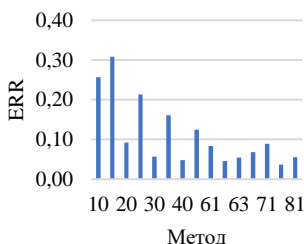
### 3.2 Максимальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону

В табл. 7 та на рис. 20 наведені максимальні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделюванням у додатку XCOS.

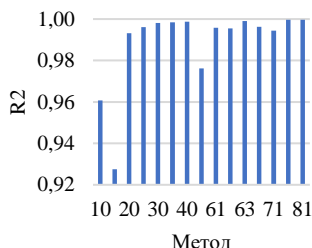
Таблиця 7

**Максимальні значення похибки ERR та R2 для всієї вибірки**

	Метод															min	max
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81		
ERR	0,25	<b>0,308</b>	0,09	0,213	0,058	0,162	0,047	0,128	0,081	0,045	0,056	0,072	0,0915	<b>0,0317</b>	0,0587	<i>0,032</i>	<i>0,308</i>
R2	0,96	<b>0,916</b>	0,99	0,996	0,999	0,999	0,998	0,977	0,996	0,996	0,999	0,996	0,996	<b>0,9996</b>	<b>0,9996</b>	<i>0,916</i>	<i>0,9996</i>



а)

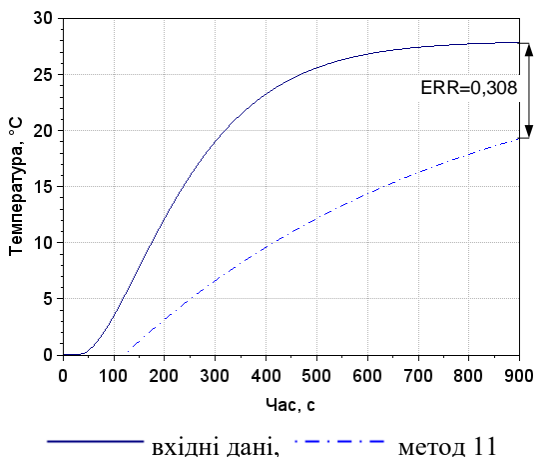


б)

**Рис. 20. Максимальні значення по кожному методу для всіх варіантів кривих розгону: а) ERR; б) R2**

Аналіз наведених результатів підтверджує попередній висновок про те, що за допомогою методу 11 отримані незадовільні результати – максимальне значення максимальної відносної статичної похибки складає 0,308 (рис. 21) та максимальне значення коефіцієнта детермінації не перевищує 0,916.

Використання методів 30, 40, 62, 63, 80 та 81 для ідентифікації ОК забезпечує такі максимальні значення відносної статичної похибки моделювання, що не перевищують 0,05. Використання методів 20, 21, 30, 31, 40, 61, 62, 63, 70, 71, 80, 81 забезпечують такі максимальні значення коефіцієнта детермінації R2, що перевищують 0,99.



**Рис. 21. Результати моделювання з використанням методу 11 для варіанту 21**

Для ілюстрації максимального значення відносної статичної похибки на рис. 21 наведено результати моделювання кривої розгону з використанням параметрів ОК, визначених за допомогою методу 11 для експериментальних даних варіанта 21. Очевидна суттєва невідповідність результатів моделювання експериментальним даним.

### **3.3 Мінімальні значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації для всієї вибірки кривих розгону**

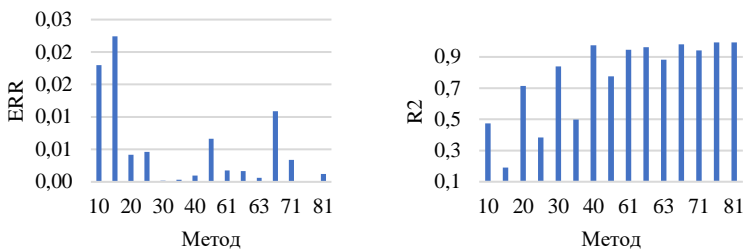
В табл. 8 та на рис. 22 наведені мінімальні значення відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2 для всіх варіантів експериментальних даних кривих розгону, визначені за допомогою вищезгаданих п'ятнадцяти методів моделюванням у додатку XCOS.

Таблиця 8

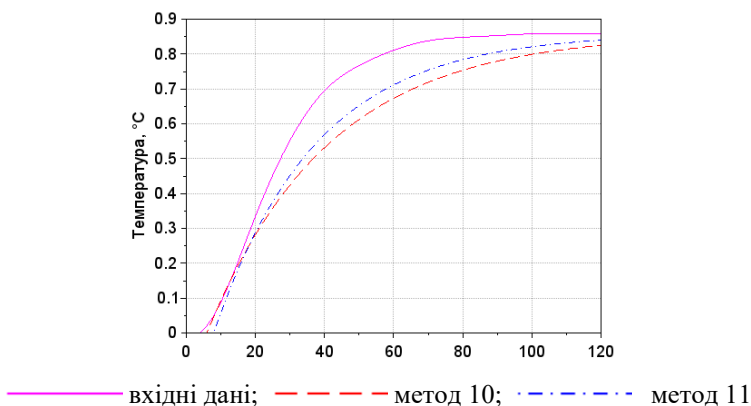
**Мінімальні значення похибки ERR та R2 по всім варіантам**

№	Метод															min	max
	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81		
ERR	0,0184	<b>0,0243</b>	0,004	0,0054	<b>0,0002</b>	0,0005	0,001	0,007	0,002	0,0016	0,0009	0,011	0,0032	0,0003	0,0013	<b>0,0002</b>	<b>0,0243</b>
R2	0,474	<b>0,1918</b>	0,7317	0,3859	0,8586	0,496	0,974	0,787	0,954	0,9677	0,8984	0,982	0,9406	<b>0,9923</b>	0,9757	<b>0,1918</b>	<b>0,9923</b>

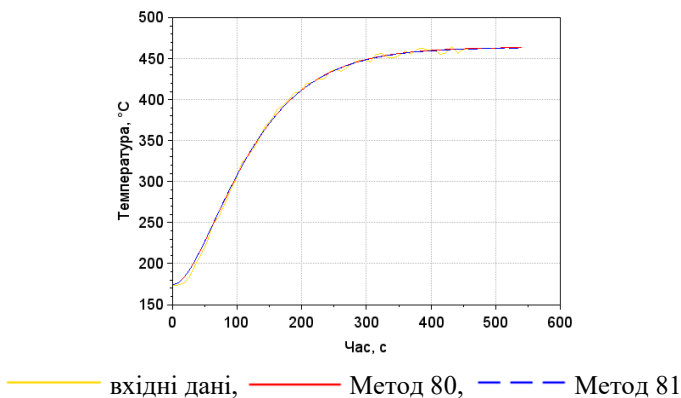
При аналізі наведених результатів є очевидним висновок, що використання методу 11 знову призвело до отримання найгірших показників – найбільшого з мінімальних значення похибки 0,0243 (рис. 23) та найменшого з мінімальних значення коефіцієнта детермінації 0,1918. Також можна бачити, що для метода 80 мінімальне значення коефіцієнта детермінації перевищує 0,99, а мінімальне значення відносної статичної похибки дорівнює 0,0003 (рис. 24).



**Рис. 22. Мінімальні значення ERR та R2 по кожному методу для всіх варіантів кривих розгону**



**Рис. 23. Результати моделювання з використанням методу 11 для варіанту 38**



**Рис. 24. Результати моделювання з використанням методу 80/81 для варіанту 4**

### **3.4 Зведена інформація щодо показників моделювання кривих розгону для всієї вибірки**

При аналізі наведеної табл. 9 та на рис. 25 зведеної інформації щодо мінімальних і максимальних значень відносної статичної похибки ERR та коефіцієнта детермінації R2, отриманих з використанням усіх методів, можна відзначити, що:

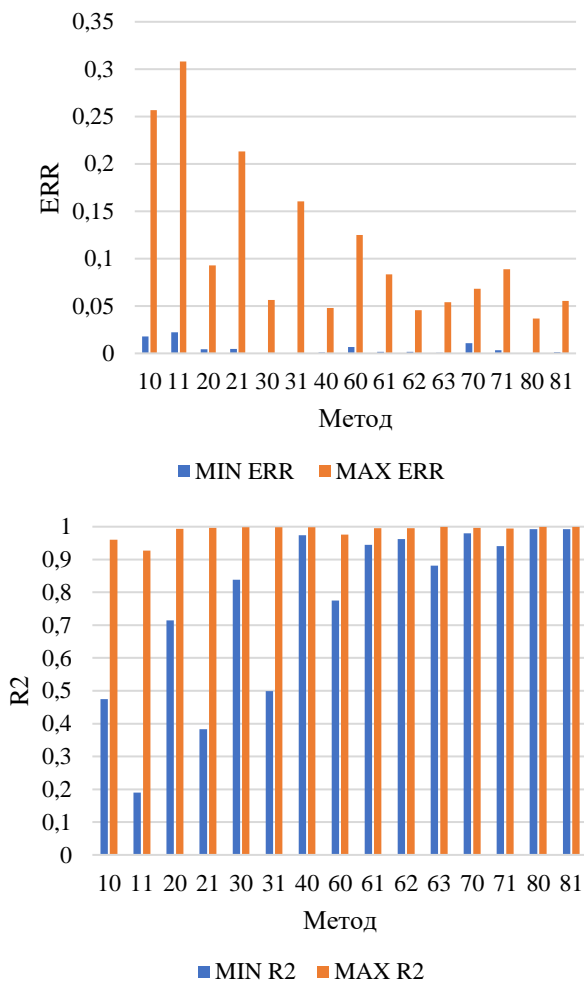
- використання Методу 11 спричиняє наявність найбільших значень похибки в діапазоні від 0,0224 до 0,3081 та може забезпечити R2 не більше 0,9275;
- Метод 10 забезпечує кращі результати, порівняно з Методом 11, але максимальний R2 не більше 0,9607 та похибку ERR не нижче 0,018;
- використання Методу 80 забезпечує найкращі характеристики – найменший діапазон по ERR та R2.

Таблиця 9

#### **Зведена інформація по методам**

<b>Метод</b>	<b>min ERR</b>	<b>max ERR</b>	<b>min R2</b>	<b>max R2</b>
10	0,0180	0,2568	0,4742	0,9607
11	0,0224	0,3081	0,1903	0,9275
20	0,0042	0,0927	0,7149	0,9932
21	0,0046	0,2131	0,3832	0,9961
30	0,0002	0,0565	0,8386	0,9981
31	0,0003	0,1605	0,4993	0,9984
40	0,0010	0,0479	0,9738	0,9987
60	0,0066	0,1248	0,7749	0,9761
61	0,0017	0,0833	0,9450	0,9958
62	0,0016	0,0455	0,9619	0,9955
63	0,0006	0,0541	0,8818	0,9991
70	0,0109	0,0682	0,9803	0,9963
71	0,0034	0,0888	0,9407	0,9945
80	0,0001	0,0368	0,9921	0,9997
81	0,0012	0,0554	0,9921	0,9997





**Рис. 25. Зведена інформація щодо мінімальних та максимальних значень відносної статичної похибки моделювання та коефіцієнта детермінації**

### 3.5 Аналіз точності методів на підставі забезпечуваних при моделюванні значень відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації

#### 3.5.1 Аналіз точності усіх методів дослідження

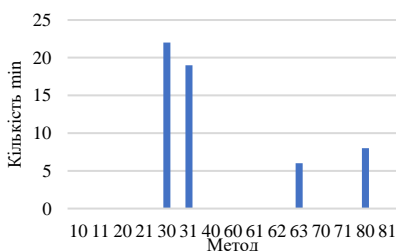
Були проаналізовані значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації, отримані в результаті моделювання кривих розгону з параметрами ОК, знайденими усіма методами, з метою визначити частоту забезпечення кожним методом мінімального значення похибки ERR або максимального значення коефіцієнта детермінації R2 (табл. 10, рис. 26) та зроблені наступні висновки:

- найчастіше мінімальне значення похибки забезпечують Методи 30, 31, 63 та 80, які використовують апроксимацію аперіодичною ланкою другого порядку;
- найчастіше максимальне значення R2 наявне при використанні Методів 40 та 80.

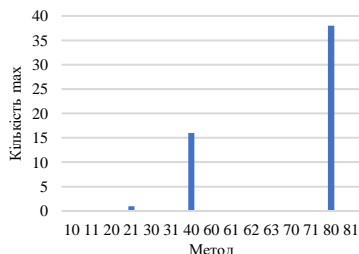
Таблиця 10

**Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом для всієї вибірки КР**

	Метод															
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81	
min ERR	0	0	0	0	22	19	0	0	0	0	6	0	0	8	0	
max R2	0	0	0	1	0	0	16	0	0	0	0	0	0	38	0	



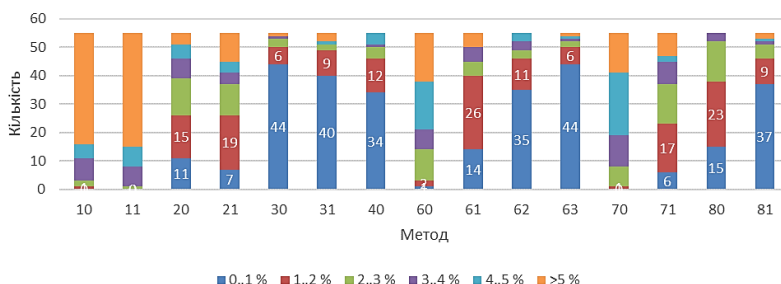
а)



б)

**Рис. 26. Частота забезпечення кожним методом для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R2**

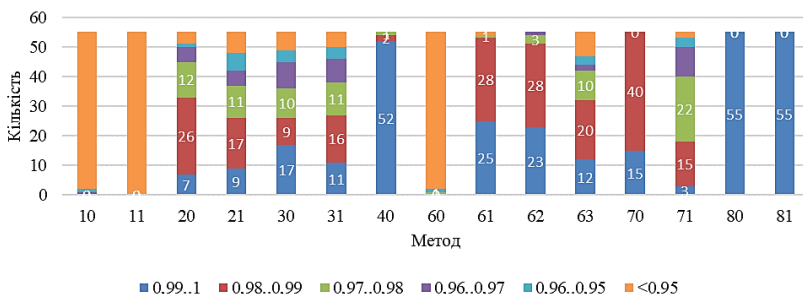
Було визначено частоту забезпечення кожним методом відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень (рис. 27).



**Рис. 27. Частота забезпечення кожним методом відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень**

Як видно з рис. 27 найкращі результати щодо ERR забезпечує використання Методів 30, 31, 40, 62, 63, 81, а найгірші – Методи 10, 11, 60, 70.

Також було визначено частоту забезпечення кожним методом коефіцієнта детермінації R2 в різних діапазонах його значень (рис. 28).



**Рис. 28. Частота забезпечення кожним методом коефіцієнта детермінації R2 в різних діапазонах його значень**

Як видно з рис. 28 найкращі результати щодо R2 забезпечує використання Методів 40, 61, 62, 70, 80, 81, а найгірші – Методи 10, 11, 60.

З наведених результатів (рис. 27, 28) можна зробити висновок, що Методи 11, 21, 31, які передбачають визначення точки перегину КР та параметрів ОК вручну, забезпечують приблизно однакові результати в порівнянні з Методами 10, 20, 30 з автоматичним визначенням, як для відносної статичної похибки, так і для коефіцієнта детермінації. Отже, зважаючи на недосконалість методів з ручним визначенням через

присутність людського фактору, було прийнято рішення виключити Методи 11, 21, 31 із подальших досліджень.

### 3.5.2 Аналіз точності методів дослідження з автоматичним визначенням параметрів

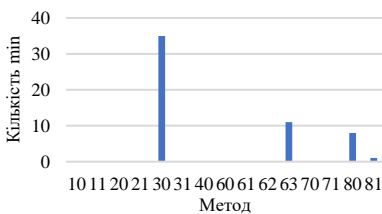
Було проведено аналіз методів, окрім Методів 11, 21, 31, аналогічний вищеописаному в п. 3.5.1, результати якого наведені в табл. 11 та на рис. 29, 30, 31 та зроблені наступні висновки:

- найчастіше мінімальне значення похибки забезпечують Методи 30 та 63;
- найчастіше максимальне значення R2 наявне при використанні Методів 40 та 38.

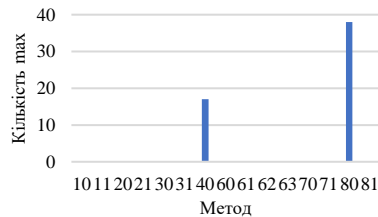
Таблиця 11

**Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом з автоматичним визначенням для всієї вибірки КР**

№	Методи											
	10	20	30	40	60	61	62	63	70	71	80	81
min ERR	0	0	35	0	0	0	0	11	0	0	8	1
max R2	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	38	0



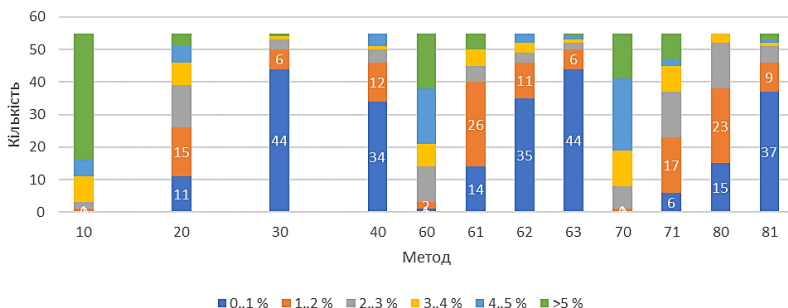
а)



б)

**Рис. 29. Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R2**

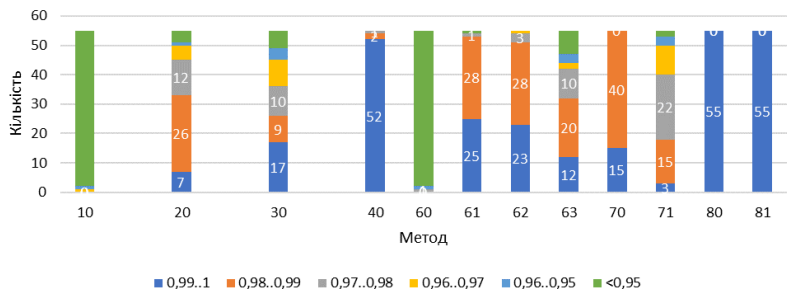
Було визначено частоту забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень (рис. 30).



**Рис. 30. Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням відносної статистичної похибки ERR в різних діапазонах її значень**

Як видно з рис. 30 найкращі результати щодо похибки моделювання ERR забезпечує використання Методів 30, 31, 40, 62, 63, 81, а найгірші – Методи 10, 60, 70, що підтверджує попередні висновки (п. 3.5.1).

Також було визначено частоту забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням коефіцієнта детермінації  $R^2$  в різних діапазонах його значень (рис. 31).



**Рис. 31. Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням коефіцієнта детермінації  $R^2$  в різних діапазонах його значень**

З наведених результатів (рис. 29, 30) можна зробити висновок, що Методи 80 та 81 забезпечують максимальні значення коефіцієнта детермінації абсолютно для всіх КР з вибірки. Але, позаяк Методи 30, 63, 80, 81 реалізують апроксимацію даних аперіодичною ланкою другого порядку, що передбачає ускладненість реалізації через значний для контролера обсяг обчислень, було прийнято рішення виключити їх із подальших досліджень.

### 3.5.3 Аналіз точності методів дослідження з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку

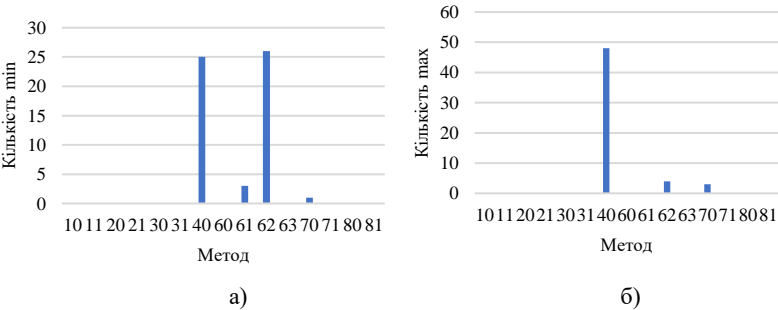
Було проведено аналіз методів з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, аналогічний вищеописаному в п. 3.5.1 та п. 3.5.2, результати якого наведені в табл. 12 та на рис. 32, 33, 34 та зроблені наступні висновки:

- Методи 40 та 62 найчастіше забезпечують мінімальне значення похибки;
- найчастіше максимальне значення коефіцієнта детермінації R2 наявне при використанні Методу 40.

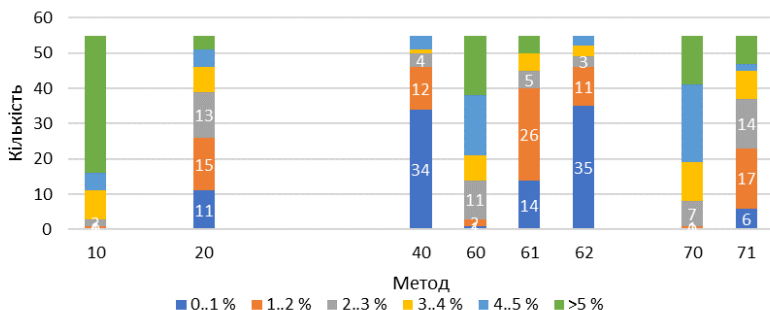
Таблиця 12

**Частота забезпечення мінімальної відносної статичної похибки ERR або максимального коефіцієнта детермінації R2 кожним методом з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, для всієї вибірки КР**

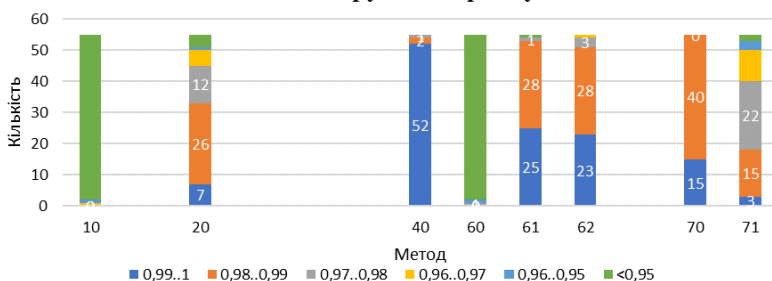
Метод	min ERR	max R2
10	0	0
20	0	0
40	25	48
60	0	0
61	3	0
62	26	4
70	1	3
71	0	0



**Рис. 32. Частота забезпечення кожним методом з автоматичним визначенням за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку, для всієї вибірки КР: а) мінімальної відносної статичної похибки ERR; б) максимального коефіцієнта детермінації R2**



**Рис. 33. Частота забезпечення відносної статичної похибки ERR в різних діапазонах її значень кожним методом з автоматичним визначенням, за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку**



**Рис. 34. Частота забезпечення коефіцієнта детермінації R2 в різних діапазонах його значень кожним методом з автоматичним визначенням, за виключенням тих, що апроксимують ланкою другого порядку**

З наведених результатів (рис. 33, 34) можна зробити висновок, що при виключенні методів, що апроксимують ланкою другого порядку, використання Методів 40 та 62 забезпечує найменші значення відносної статичної похибки при моделюванні для більш ніж 60% вибірки, а також найбільші значення коефіцієнта детермінації для 94% вибірки.

### **3.6 Аналіз стабілізації параметра об'єкта керування при моделюванні**

Відомо, що для аперіодичних об'єктів при реакції на стрибкоподібний вплив вихідна величина має досягти 98-99% рівноважного сталого значення за час, який складає  $5 \cdot T_{об}$ .

В якості критерію для порівняння результатів використання методів ідентифікації було обрано відношення  $5 \cdot T_{об}$  до тривалості експерименту по зняттю кривої розгону  $T$ :

$$k = \frac{5 \cdot T_{об}}{T} \quad (22)$$

В ідеальному випадку отримані при моделюванні параметри об'єкта керування мають забезпечити досягнення вихідною величиною сталого значення за  $5 \cdot T_{об}$  з мінімальним значенням відносної статичної похибки ERR та максимальним значенням коефіцієнта детермінації  $R^2$ .

У табл. 13 та на рис. 35 наведена кількісна характеристика забезпечення критерія  $k$  усіма методами в різних діапазонах його значення.

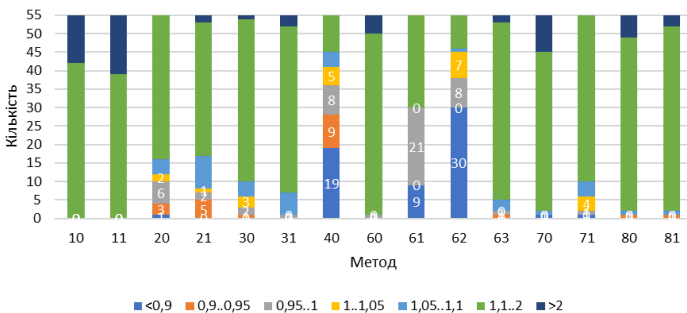
Слід відзначити, що по результатах аналізу в п. 3.5.2 використання Методу 80 забезпечило найкращі значення відносної статичної похибки та коефіцієнта детермінації, але при аналізі здатності методу забезпечити досягнення сталого стану були отримані результати критерію  $k$ , які у переважній більшості значень належать до діапазону 1,1 – 2,0.

В той же час використання методів 40 та 62 забезпечило найкращі результати як мінімальних значень похибки, так і критерію стабілізації  $k$ .

Таблиця 13

**Кількісна характеристика забезпечення критерія  $k$  усіма методами в різних діапазонах його значення**

К	Методи															
	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81	
<0,9	0	0	1	0	0	0	19	0	9	30	0	1	1	0	0	
0,9..0,95	0	0	3	5	1	0	9	0	0	0	1	0	0	1	1	
0,95..1	0	0	6	2	2	1	8	1	21	8	1	0	1	0	0	
1..1,05	0	0	2	1	3	0	5	0	0	7	0	0	4	0	0	
1,05..1,1	0	0	4	9	4	6	4	0	0	1	3	1	4	1	1	
1,1..2	42	39	39	36	44	45	10	49	25	9	48	43	45	47	50	
>2	13	16	0	2	1	3	0	5	0	0	2	10	0	6	3	



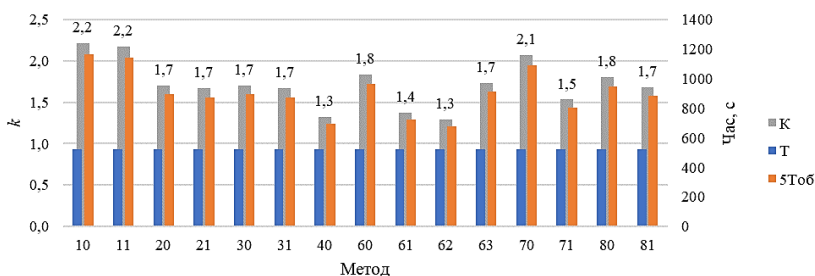
**Рис. 35. Кількісна характеристика забезпечення критерія  $k$  усіма методами в різних діапазонах його значення**



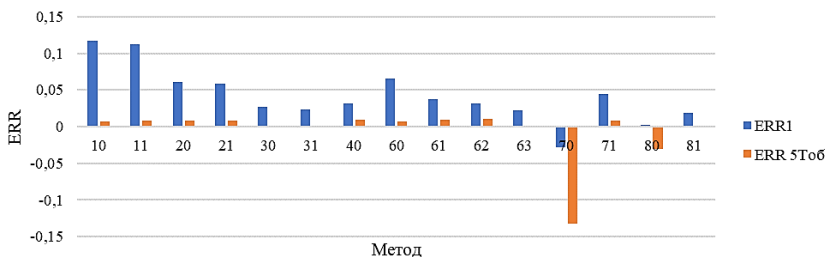
Для додаткової перевірки цих висновків було проведено обчислення критерію стабілізації  $k$  для кривої розгону ОК варіанту 24 з параметрами, визначеними усіма методами. Як можна бачити (рис. 36), Методи 40 та 62 забезпечують найкращі значення  $k$ .

Також для того, щоб додатково охарактеризувати здатність методів забезпечити досягнення сталого стану при моделюванні кривих розгону для варіанта 24 були визначені статичні похибки за час моделювання, який дорівнює часу експерименту, та за час моделювання, що дорівнює  $5 \cdot T_{об}$ .

Можна бачити з рис. 37 використання Методів 40 та 62 для варіанта 24 забезпечує достатньо низькі значення відносних статичних похибок, в той час як для методів 70 та 80 наявні суттєві статичні похибки з протилежним знаком, що підтверджує висновки в п. 3.5.2.



**Рис. 36. Критерій стабілізації  $k$ , що забезпечується усіма методами для варіанта 24**



**Рис. 37. Статична похибка для варіанта 24 за час моделювання, що дорівнює: Err – часу експерименту; Err5Tоб –  $5 \cdot T_{об}$ .**

Узагальнені результати, що містять середні значення критерію стабілізації  $k$  та відносних статичних похибок ERR та ERR5Tоб, які були отриманні при моделюванні усієї вибірки КР на підставі параметрів, визначених усіма методами, наведені у табл. 14 та на рис. 38, 39.

Таблиця 14

Середні значення  $k$ , Err та Err5Tob для усієї вибірки КР

Парам.	Метод														
№	10	11	20	21	30	31	40	60	61	62	63	70	71	80	81
$k$	1,83	1,83	1,24	1,31	1,35	1,41	<b>0,98</b>	1,64	<b>1,09</b>	<b>0,95</b>	1,37	1,76	1,30	1,57	1,48
ERR1	0,08	0,08	0,03	0,04	0,008	0,014	<b>0,012</b>	0,050	<b>0,020</b>	<b>0,012</b>	0,01	-0,04	0,029	-0,01	0,01
ERR5Tob	0,008	0,01	0,01	0,01	0,001	0,001	<b>0,012</b>	0,007	<b>0,012</b>	<b>0,014</b>	0,001	-0,122	0,008	-0,033	0,001

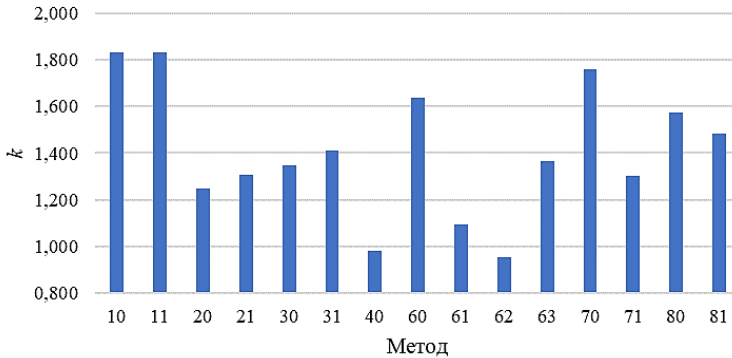
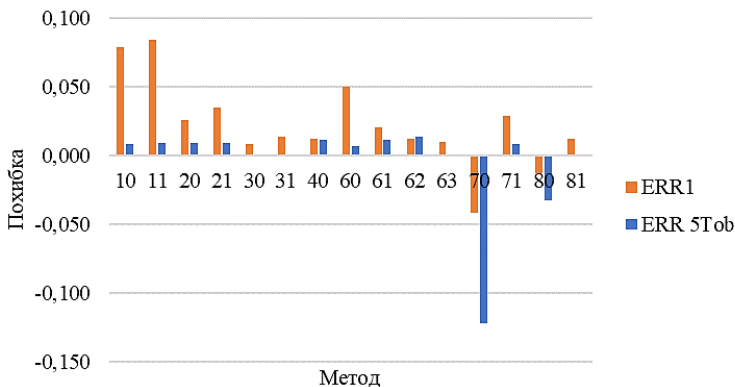
Рис. 38. Середні значення критерію  $k$ , визначені усіма методами для усієї вибірки КР

Рис. 39. Середні значення відносних статичних похибок ERR та ERR5Tob, визначені усіма методами для усієї вибірки КР

Можна бачити, що наведені результати підтверджують раніше зроблені висновки щодо переважної ефективності використання Методів 40 та 62 для ідентифікації ОК. Також підтвердилася недоцільність використання

методів, що передбачають апроксимацію рівняннями аперіодичних ланок першого (Метод 70) та другого порядку (Метод 80), через суттєві залишкові відхилення вихідного параметру ОК.

## ВИСНОВКИ

1. У дослідженні було проаналізовано декілька різних підходів до ідентифікації об'єкта керування: визначення точки з максимальною швидкістю зміни регульованого параметру та побудови дотичної в цій точці, різні методи визначення реакції об'єкта в одній або двох точках, апроксимація експериментальної кривої розгону відповідними рівняннями аперіодичних ланок першого та другого порядку.

2. Було встановлено, що для оцінки метода ідентифікації ОК недостатньо використовувати лише один параметр: відносну статичну похибку ERR, коефіцієнт детермінації R2 або критерій стабілізації k. Слід розробити комплексний коефіцієнт оцінки, який буде враховувати ці всі характеристики адекватності моделювання.

3. Для результатів дослідження значення коефіцієнта детермінації моделей в залежності від обраного методу визначення параметрів варіюється від 0,85 до 0,99. Це свідчить про відсутність єдиного універсального методу, використовуючи який можна отримати адекватні параметри ОК для кожної кривої розгону з досліджуваної вибірки. В деяких методах визначений час запізнення перевищує час запізнення вхідної кривої розгону, коефіцієнт детермінації та відносна статична похибка мають низькі значення.

4. Слід зважати на той факт, що у виробничих умовах немає можливості використовувати в системах керування програмні застосунки на кшталт Scilab, це пов'язано з браком швидкодії ПЛК, але є можливість запрограмувати чисельний метод для вирішення поставлених задач.

5. Для формування цілісної картини в подальшому буде визначено вплив ступеня та типу згладжування вхідних даних на зменшення квадрату похибки моделювання та статичної похибки; розроблено алгоритм для визначення точки перегину КР; визначено комплексний критерій оцінки якості результатів моделювання; розроблено алгоритм визначення параметрів об'єкту на працюючому агрегаті / технологічному процесі; досліджено вплив отриманих параметрів ОК на налаштування регулятора та якість перехідних процесів.

6. В наявних на виробництві системах автоматизованого управління реалізація автоматичного визначення параметрів об'єкту керування дозволить підвищити ефективність роботи системи та, відповідно, технологічного агрегату за рахунок більш якісного онлайн налаштування контурів регулювання.

## АНОТАЦІЯ

Ідентифікацію об'єктів керування проводять з метою отримання параметрів, що характеризують їхні основні динамічні властивості, які є важливими з точки зору керування технологічними процесами. Ці властивості, зокрема, інерційність та час реагування для статичних об'єктів із самовирівнюванням, за певних умов функціонування технологічного агрегату з часом можуть змінюватися, що спричинить зниження якості регулювання відповідними параметрами. Задля врахування цих змін в таких агрегатах періодично проводять коригуючі налаштування регуляторів локальних систем регулювання технологічними параметрами. На практиці зазвичай використовують ручне налаштування регуляторів шляхом підбору відповідних коефіцієнтів або автоматичне – за умови наявності відповідних технічних та програмних засобів. Обидва способи мають суттєві недоліки, зокрема, значну тривалість розрахунків, а також обмежені діапазон та точність регулювання технологічних параметрів.

Метою дослідження є визначення універсального методу ідентифікації параметрів об'єктів керування, що при практичному використанні забезпечить оптимальні показники якості процесу регулювання технологічними параметрами.

Аналіз результатів дослідження показав відсутність єдиного універсального методу, використовуючи який можна отримати адекватні параметри об'єкта керування для кожної кривої розгону з досліджуваної вибірки.

## Література

1. Шпарук Б. О., Поліщук І. А. Адаптивне керування інерційними квазістаціонарними об'єктами. *Молодий вчений*. 2017. № 4. С. 577–582. URL: <http://molodyvcheny.in.ua/files/journal/2017/4/135.pdf>.
2. Lipták B. G. Instrument engineers' handbook. 4th ed. CRC Press, 2018. Vol. 2 : Process control and optimization. 2464 p.
3. Rengaswamy R., Srinivasan B., Bhatt N. P. Process Control Fundamentals. CRC Press, 2020. URL: <https://doi.org/10.1201/9780367433437>.
4. Identification of a damped PT2 system. URL: <https://hackaday.io/page/4829-identification-of-a-damped-pt2-system>
5. Lineares zeitinvariantes System. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares\\_zeitinvariantes\\_System](https://de.wikipedia.org/wiki/Lineares_zeitinvariantes_System)
6. Fitting step responses URL: [https://dynamics-and-control.readthedocs.io/en/latest/1\\_Dynamics/7\\_System\\_identification/Dynamic\\_model\\_parameter\\_estimation.html](https://dynamics-and-control.readthedocs.io/en/latest/1_Dynamics/7_System_identification/Dynamic_model_parameter_estimation.html)

7. A Python library for solving textbook control problems. URL: <https://github.com/alchemyst/Dynamics-and-Control>
8. Scilab. URL: <https://www.scilab.org/>
9. Datafit. URL: [https://help.scilab.org/docs/2023.1.0/en\\_US/datafit.html](https://help.scilab.org/docs/2023.1.0/en_US/datafit.html)

**Information about the authors:**

**Koyfman Oleksiy Oleksandrovych,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems  
LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”  
80, Pivdenne shose street, Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Miroshnichenko Viktoriia Ihorivna,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor at the Department of Automation,  
Electrical and Robotic Systems  
LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”  
80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Simkin Oleksandr Isakovich,**

Candidate of Technical Sciences, Professor,  
Professor at the Department of Automation, Electrical and Robotic Systems  
LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”  
80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

# 04

## CHAPTER

### **Modern eco- friendly practices and prospects for environmental protection**

## УТИЛІЗАЦІЯ ВІДХОДІВ РУДОЗБАГАЧЕННЯ ПО СКЛЯНИЙ ТЕХНОЛОГІЇ

Жданюк Н. В., Племянніков М. М.

### ВСТУП

Внаслідок роботи гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Кривбасу накопиченні відвали порід, так званих хвостів рудозбагачення, що створюють серйозні економічні та екологічні проблеми в районах з розвиненим гірничо-металургійним виробництвом<sup>1</sup>. Тільки на Кривбасі хвостосховища такого типу займають площу близько 7–10 тис. га, що призводить до погіршення екологічної ситуації в регіоні<sup>2</sup>.

Необхідно відмітити, що на даний час накопичений достатній досвід утилізації відходів гірничо-збагачувальних комбінатів, однак, масштаби та темпи освоєння цих ресурсів для виробництва будівельних матеріалів не можна визнати задовільними<sup>3</sup>.

Так звані хвости, хоча і є відходами, але мають високу ресурсну цінність. У їхньому складі присутні  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  та ін. Враховуючи, що всі вище перераховані оксиди використовуються у скловарінні, була вивчена можливість використання хвостів збагачення як основного компоненту сировинної суміші для отримання скла та склокристалічних матеріалів. Прогнозування властивостей отриманих матеріалів проводили відповідно до діаграм стану трьохкомпонентних систем схожих складів  $\text{Na}_2\text{O-FeO-SiO}_2$ ,  $\text{MgO-FeO-SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,

$\text{MgO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  та інших.

З метою отримання склоподібних матеріалів та вивчення їх властивостей були обрані склади зразків, що дозволили охарактеризувати систему в цілому. Також, враховуючи, що досліджувані системи мають здатність до ліквідації, одним із завдань які

---

<sup>1</sup> Matinde, E., Simate, G.S., Ndlovu, S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. 118(8). P. 825-844. <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>

<sup>2</sup> Жданюк Н.В., Племянніков М.М. Новий склокристалічний матеріал на основі відходів металургійних виробництв. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій : праці міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 80-річчю кафедри хімії ХНУМГ ім. О. М. Бекетова (Харків, 7–8 листоп. 2019 р.) Харків, 2019. С. 126.

<sup>3</sup> Martins, N. P., Srivastava, S., Simão, F. V., Niu, H., Perumal, P., Snellings, R., Habert, G. Exploring the potential for utilization of medium and highly sulfidic mine tailings in construction materials: A review. *Sustainability*. 2021. 13(21). P. 12150.

вирішувалися під час дослідження було отримання облицювального матеріалу з високим декоративним ефектом<sup>4</sup>.

Використання вторинної сировини сприяє зниженню екологічного навантаження на навколишнє середовище, розширенню мінерально-сировинної бази і скорочення потреби в первинній сировині<sup>5</sup>.

Таким чином, створення нових технологій утилізації відходів рудозбагачення по скляній технології є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз літературних джерел показав, що на даний час накопичений певний досвід використання відходів чорної металургії для виробництва різноманітних будівельних матеріалів, у тому числі скла та склокристалічних матеріалів<sup>6</sup>.

Але, така вторинна сировина суттєво відрізняються від традиційної по мінеральному та хімічному складу, а також фізико-хімічним та технологічним властивостям. Використання відходів рудозбагачення у технологічних процесах виготовлення скла та склокристалічних матеріалів потребує регулювання властивостей сировини і кінцевої продукції, управління параметрами технологічного процесу.

Як відомо, промислове скло характеризується дуже низьким вмістом оксидів заліза, що мають здатність забарвлювати його. Для промислових стекол вміст оксидів заліза обмежується в масових %: 0,012-0,025. Так як у відходах рудозбагачення чорних металів вміст оксидів заліза перевищує ці показники у десятки разів, потребує використання спеціальних технологічних рішень<sup>7</sup>.

## **1. Формувальні властивості скломаси та її в'язкісні характеристики**

Для досліджень використовували відходи збагачення залізної руди Криворізьського гірничо-збагачувального комбінату, так звані хвости рудозбагачення.

Синтез скла та склокристалічних матеріалів на основі хвостів рудозбагачення здійснювався шляхом додаткового введення в шихту

---

<sup>4</sup> Moosavi-Khoonsari, E., Jung, I.H. Critical Evaluation and Thermodynamic Optimization of the  $\text{Na}_2\text{O-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. 47. P. 291–308. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0504-x>

<sup>5</sup> Плем'янніков М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2020. № 42 (1). P. 51–58.

<sup>6</sup> Piatak N. M., Parsons M. B., Seal II R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: a review. *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 57. P. 236–266.

<sup>7</sup> Плем'янніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. *Питання хімії та хімічної технології*. 2021. No. 2. С. 95-103. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103



оксидів  $\text{Na}_2\text{O}$  та  $\text{MgO}$ . Компоненти подрібнювали та просіювали. Для синтезу скла відбирали фракцію  $\leq 0,5$  мм.

Варку скла проводили у шамотних тиглях ємністю 250 мл при температурі  $145 \pm 10^\circ\text{C}$  у лабораторній печі протягом 2 год. Відпал зразків проводили у муфельній печі при температурі  $550\text{--}600^\circ\text{C}$ . Склокристалічний матеріал отримували шляхом кристалізація зразків скла у муфельній печі в інтервалі температур  $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ .

Кварцити можуть бути віднесені до феро- та феросилікатних систем. Специфічною особливістю відходів рудозбагачення ГЗК Криворізьського басейну є значний вміст оксидів феруму (12–15 мас. %)<sup>8</sup>. У хвостах рудозбагачення ферум (II) оксид та ферум (III) оксид містяться приблизно у однакових кількостях. Основним компонентом хвостів рудозбагачення є Силіцій (IV) оксид. Також, у хвостах рудозбагачення присутні у невеликих кількостях оксиди лужноземельних металів, алюміній оксид, а також незначна кількість фосфору та сірки. Втрати при прожарюванні (в.п.п.) складають 11,02%.

Хімічний склад хвостів рудозбагачення представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Хімічний склад хвостів рудозбагачення, %**

Склад хвостів	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{FeO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	P	S	в.п.п.
Вміст, %	7,62	8,18	63,1	3,58	5,44	0,89	0,065	0,112	11,02

Хімічний склад хвостів рудозбагачення показав, що у них присутні всі ті компоненти, які тій чи іншій мірі містяться у більшості стекол. Виключенням є оксиди феруму, які містяться у значних кількостях, у порівнянні із складами стекол. Так як основний склад кварцитів - це кремнезем ( $\text{SiO}_2$ ) і оксиди феруму ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{FeO}$ ), даний склад можна розглядати як бінарну систему. Така система характеризується високою тугоплавкістю та не може безпосередньо бути використана у класичній скляній технології. Тому до складу шихти, крім відходів рудозбагачення потрібно ввести компоненти, що понизять температуру варки – плавні.

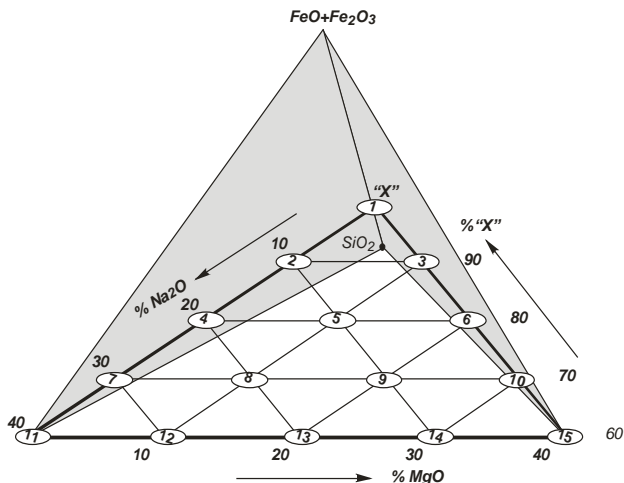
У даній роботі, у якості підшихтовки використано  $\text{MgO}$  та  $\text{Na}_2\text{O}$ . Магній оксид – це недефіцитний компонент. У склад шихти його можна ввести за допомогою магнезитум. Натрій оксид – це також доступний компонент. Він може бути введений у шихту содою. Натрій оксид у

---

<sup>8</sup> Губіна В.Г., Кадошніков В.М., Заборовський В.С., Кузенко С.В., Горлицький Б.О, Бондаренко Г.М. Вивчення можливості використання відходів збагачення залізистих кварцитів в народному господарстві. 36. наук. пр. ІГНС НАН України «Геохімія та екологія». Вип.14. К. 2007. С. 156–165.

силікатних системах виступає у ролі плавня. Його присутність у шихті дозволяє суттєво знизити температуру варки скла<sup>9</sup>.

Для досліджень вибрана чотирьохкомпонентна система з вершинами  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  та  $\text{Na}_2\text{O}$ . Точка «х» відповідає співвідношенню оксидів  $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/\text{SiO}_2$ , що містяться у прокаленому залишку хвостів. Таким чином, ми отримуємо трьохкомпонентну систему. Вміст решти компонентів є незначним. Для отримання систематизованих даних по властивостям силікатних розплавів у полі перерізу, що примикає до точки «х». Це поле розбито на трикутну сітку з кроком по вмісту компонентів 10 %. Таким чином, дослідили склади: «х» – (60–100%),  $\text{Na}_2\text{O}$  – (0–40%) та  $\text{MgO}$  – (0–40%), що відповідають вузлам сітки<sup>10</sup>. Таким чином для досліджень вибрано 15 складів. Схема їх розміщення показана на рис. 1.



**Рис. 1. Схема вибору складів стекел у системі  
( $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ )- $\text{SiO}_2$ )- $\text{MgO}$ - $\text{Na}_2\text{O}$**

<sup>9</sup> Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів» / М. М. Племянніков, Н. В. Жданюк – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 152 с.

<sup>10</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів. Norwegian Journal of development of the International Science. 2020. № 42 (1). P. 51–58.

Важливою технологічною властивістю скляного розплаву є його здатність до формування. Дослідження показали, що всі обрані зразки можуть отримані виливом у форму або прокатом. Всі склади, за виключенням зразків 1,3 та 14 показали високі формувальні властивості. Таким чином. Отримано п'ятнадцять зразків, більшість з яких мали глибокий чорний колір та глянцеvu поверхню. На поверхні зразків 5 та 13 спостерігали розводи оливкового на димчастого кольору відповідно на чорній поверхні. Після кристалізації зразки скла у більшості випадків покращували свої декоративні властивості. Стекла, що мали підвищений вміст  $\text{Na}_2\text{O}$ , після кристалізації набували бурого відтінку. Такі зміни можна пояснити утворенням фериту, що погіршує декоративні властивості зразків.

Так як всі склади стекол мають схильність до кристалізації, і не можуть бути дослідженими класичними методами, так як еребіг процесів кристалізації впродовж термостатування зразків спотворить кінцевий результат вимірювання. Тому в'язкісні характеристики будемо трактувати по результатам дослідження термічного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР). Розрахунки проводили як для певного температурного інтервалу, так і для всього прямолінійного відрізка. Середнє значення обчислювали по формулі:

$$\alpha_{t_0-t} = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta t}, \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

де  $t_0$ ,  $t$  – відповідно початкова і кінцева температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta l$  – подовження зразка при зміні його температури від  $t_0$  до  $t$ , мм;  $l_0$  – початкова довжина зразка при  $t_0$ , мм;  $\Delta t$  – різниця температур,  $^\circ\text{C}$ .

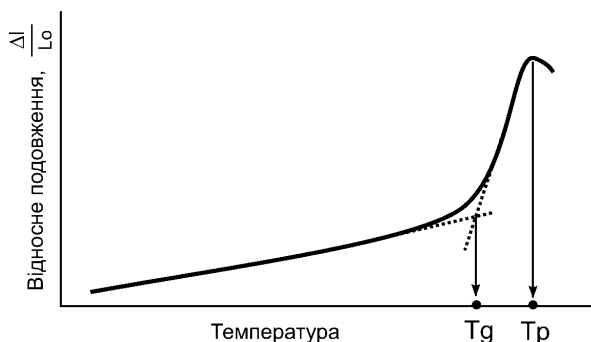
Температура трансформації є приблизною є температурою відпау ( $T_g$ ). Ця температура є нижньою межею аномального інтервалу. Вона приблизно відповідає в'язкості  $10^{12}$  Па·с та визначається точкою зламу на кривій між першою та другою ділянкою. Перехід до аномального інтервалу може бути різкий або поступовий<sup>11</sup>. Він визначається точкою перетину двох дотичних прямих, як це показано на рис. 2.

Для характеристики в'язкості ми використали дві характеристичні температурами, а саме: температурою відпау  $T_g$  і температурою розм'якшення під навантаженням  $T_r$ .

Ці дані дозволяють описати в'язкість в певному інтервалі температур.

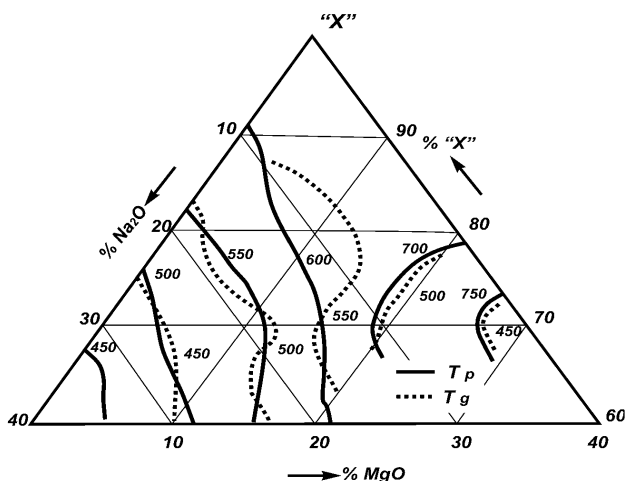
---

<sup>11</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2022. 152 с.



**Рис. 2.** Дилатометрична крива із характерними точками.

Розподіл дилатометричних температур розм'якшення ( $T_p$ ) та температури відпалу ( $T_g$ ) у системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$  наведені на рис 3<sup>12</sup>.

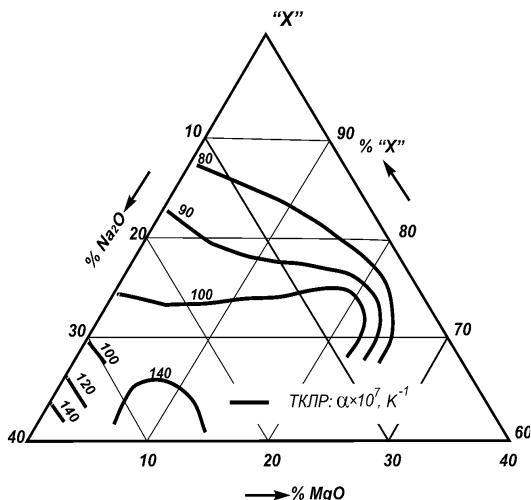


**Рис. 3.** Розподіл дилатометричних температур розм'якшення ( $T_p$ ) та температури відпалу ( $T_g$ ) у системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$

<sup>12</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристаличних матеріалів. Norwegian Journal of development of the International Science. 2020. № 42 (1). P. 51–58.

Як і варто було очікувати, найбільш тугоплавкими є висомагнезійні склади. Фронт ізоліній  $T_g$  і  $T_p$  знижуються в бік зменшення вмісту  $MgO$ , а потім від сторони трикутника «X»- $MgO$ . Сильну флюсоуючу дію надає  $Na_2O$ .

На рис. 4 представлено діаграму значень ТКЛР зразків стекол. Величини ТКЛР отриманих зразків змінюється в діапазоні  $(80 \div 140) \cdot 10^{-7}$ ,  $K^{-1}$ . Найбільший вплив на підвищення збільшення ТКЛР спостерігаємо в області зменшення вмісту  $MgO$  до 35%<sup>13</sup>.



**Рис. 4. Розподіл значень ТКЛР у системі  $((Fe_2O_3-FeO)-SiO_2)-MgO-Na_2O$**

## **2. Кристалізаційна здатність стекол системи $((Fe_2O_3-FeO)-SiO_2)-MgO-Na_2O$**

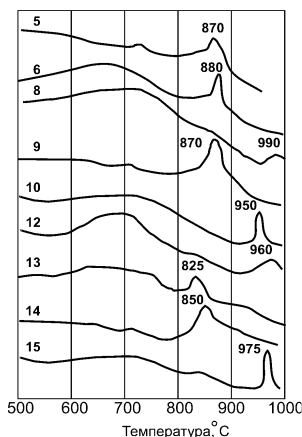
Кристалізаційна здатність зразків оцінювалась по утворенні кристалічної фази та визначали за результатами ДТА по величині піку екзотермічного ефекту.

Термогравіметричні дослідження сорбентів проводили на приладі Derivatograph Q-1500 (Угорщина) системи «Паулік-Паулік-Ердей». Зразки аналізували в динамічному режимі зі швидкістю нагрівання  $10^\circ C/xв$  до  $1000^\circ C$  в атмосфері повітря. Маса зразків становила 1500 мг. В якості еталонної речовини використовували  $Al_2O_3$ . В експериментах

<sup>13</sup> Племянников М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів. Norwegian Journal of development of the International Science. 2020. № 42 (1). P. 51–58.

використовувався платиновий тигель. Чутливість за шкалою ДТА складала 250 мкВ.

Результати дилатометричних досліджень показані на рис. 5.



**Рис. 5. Результати диференціального термічного аналізу синтезованих зразків системи ((Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO)-SiO<sub>2</sub>)-MgO-Na<sub>2</sub>O**

Кристалізаційну здатність зразків скла оцінювали за бальною системою і диференціювали як високу, середню чи низьку. На рисунку 6 наведена оцінка здатності зразків системи ((Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO)-SiO<sub>2</sub>)-MgO-Na<sub>2</sub>O до кристалізації та відповідна температура екзоэффекта.

Дані досліджень підтверджують, найвищу кристалізаційну здатність мають склади з високим вмістом MgO. Збільшення вмісту Na<sub>2</sub>O приводить до зниження кристалізаційних властивостей.

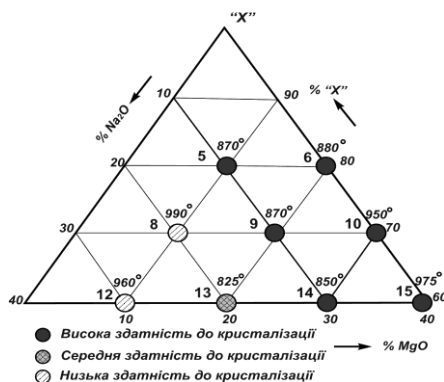
У деяких випадках кристалізація може відбуватися самочинно. Присутність Fe<sup>2+</sup> викликає кристалізацію скла швидше і суттєвіше, ніж Fe<sup>3+</sup>. Це пов'язано з роллю модифікатора Fe<sup>2+</sup>, що зможе дифундувати та стимулювати кристалізацію, тоді як Fe<sup>3+</sup> відіграє роль сіткоутворювача та є менш рухомим. Іони тривалентного заліза можуть приводити до утворення магнетиту, який, викристалізовуючись першим з силкатного розплаву при температурах нижче 1300 °C, підвищує його гетерогенність і збільшує в'язкість<sup>14</sup>. При кристалізації залізовмісних стекол утворюються кристали гематиту (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) або магнетит Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, які

<sup>14</sup> Plemiannikov M., Zhdaniuk N. Determination of the influence of temperature, concentration of ferric oxides and oxidative conditions of glass boiling on the displacement of the equilibrium of ferric oxides  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{FeO}$ . *Technology Audit and Production Reserves*, 2023. 3(1(71)). С 10–14. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.283267>

надають склу магнітних властивостей за рахунок наявності в них кластерів або кристалів з магнітними властивостями.

Таким чином, можна відмітити, що велика кількість властивостей скляних розплавів і готового скла будуть залежати від рівноваги оксидів феруму<sup>15</sup>. У першу чергу ці властивості будуть істотно залежати від координації катіонів заліза, їх концентрації, окисно-відновних умов варіння скла та температури<sup>1617</sup>.

Закристалізовані зразки покращували свої декоративні властивості у порівнянні з вихідними. Виключення складають зразки з високим вмістом  $\text{Na}_2\text{O}$ .



**Рис. 6. Здатність до кристалізації стекол у системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$**

Зменшенням вмісту  $\text{MgO}$  та підвищення вмісту  $\text{Na}_2\text{O}$  понад 10% суттєво впливає на зниження кристалізаційної здатності стекол системи  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$ .

<sup>15</sup> Calas G., Petiau J. Coordination of iron in oxide glasses through high-resolution K-edge spectra: information from the pre-edge. *Solid state communications*. 1982. 48(7). P. 625–629.

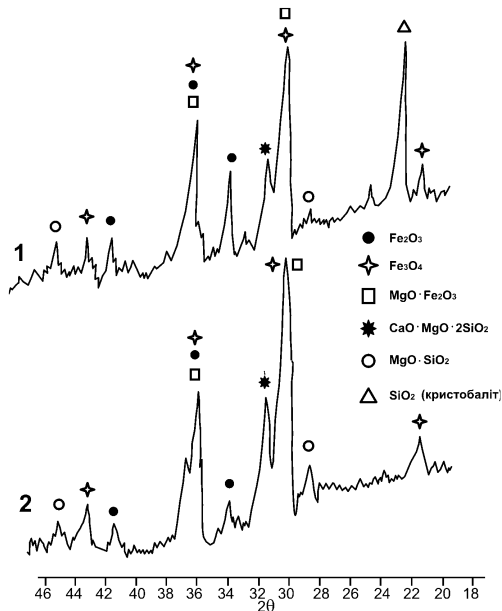
<sup>16</sup> Calas G., Petiau J. Coordination of iron in oxide glasses through high-resolution K-edge spectra: information from the pre-edge. *Solid state communications*. 1982. 48(7). P. 625–629.

<sup>17</sup> Chen S.H., Soh A.K. The capillary force in micro- and nano-indentation with different indenter shapes. *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. V. 45. P. 3122–3137.

### 3. Мінералогічний склад ситалів, отриманих з відходів рудозбагачення

Рентгенофазовий аналіз здійснювався на дифрактометрі ДРОН 3М. Рентгенівська трубка: CuK $\alpha$ . U = 30kV. Ідентифікацію фаз здійснювали за допомогою картотеки ICDD.

Рентгенофазовий аналіз був здійснений вибірково для двох складів, позначених на рис. 7 точками 2 і 5. Як витікає з рентгенограм (і це цілком очікувано), в продуктах кристалізації широко представлені мінерали на основі оксидів феруму; гематит – Fe $_2$ O $_3$ ; магнетит – Fe $_3$ O $_4$ ; феро-магнезіальна шпінель – MgO·Fe $_2$ O $_3$ . Присутні також силікати кальцію і магнію: діопсид – CaO·MgO·2SiO $_2$ ; кліноенстатит – MgO·SiO $_2$ . У висококремнеземистого складу №2 в продуктах кристалізації присутній також кристобаліт – SiO $_2$ <sup>18</sup>.



**Рис. 7. Дифрактограми зразків системи ((Fe $_2$ O $_3$ -FeO)-SiO $_2$ )-MgO-Na $_2$ O 1- склад № 2; 2 - склад № 5**

<sup>18</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів. Norwegian Journal of development of the International Science. 2020. № 42 (1). P. 51–58.



Проведені дослідження із системами, що мали підвищений вміст  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Дослідження показали, що для всіх зразків характерні полімінеральність та високий ступінь закристалізованості. Розшифровка дифрактограм проводилася по домінуючим пікам, з метою пошуку та ідентифікації залізовмісних мінералів. В системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  при окисних умовах кристалізації в кристалічній фазі домінують гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) та егіриніт ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 4\text{SiO}_2$ ). З алюмосилікатів – присутній нефелін ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ). При відновлювальних умовах кристалізації в кристалічній фазі домінують вюстит ( $\text{FeO}$ ) і фаяліт ( $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ). З алюмосилікатів присутній альбіт ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ).

Таким чином, к системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  при окисних умовах утворюються мінерали з  $\text{Fe}^{3+}$ , при відновлювальних –  $\text{Fe}^{2+}$ .

В системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$  при окислювальних і відновних умовах кристалізації спостерігаються одні і ті ж кристалічні фази: олівіні  $2(\text{Mg,Fe})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ , герцин  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , метасилікат заліза  $\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$  та шпінель  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ . Таким чином, при окисних та відновних умовах кристалізації утворюються тільки мінерали з іоном  $\text{Fe}^{2+}$ . Єдина відмінність полягає в тому, що у відновних умовах кристалізації рефлексів мінералів з іоном  $\text{Fe}^{2+}$  більш інтенсивні<sup>19</sup>.

Таким чином, внесення алюміній оксиду у систему  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-Na}_2\text{O}\text{-MgO}$  приводить до утворення наступних мінералів: нефелін ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ), альбіт ( $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ), герцин  $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  та шпінель  $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ .

#### **4. Оцінка технологічних і декоративних властивостей синтезованих стекел та склокристалічних матеріалів**

Оцінку варильної здатності зразків, агресивності скломаси по відношенню до шамоту, оцінки рельєфу поверхні та декоративних властивостей отриманих матеріалів проводили візуально. Проводили оцінку Критерії оцінювання технологічних та декоративних властивостей описані у таблиці 2.

Таблиця 2

---

<sup>19</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. Питання хімії та хімічної технології. 2021, No. 2, pp. 95–103. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103

## Критерії оцінки технологічних та декоративних властивостей отриманих матеріалів

Бали	Оцінка
<b>Критерії оцінки варильної здатності скла</b>	
0	гомогенний силікатний розплав не може бути отриманий при прийнятних температурах
1	гомогенний силікатний розплав імовірно може бути отриманий, але для цього необхідні більш високі температури і більш тривалий час
2	гомогенний силікатний розплав може бути отриманий при температурі 1500°C протягом 2-х годин
3	гомогенний силікатний розплав може бути отриманий при температурі 1400°C протягом 2-х годин
<b>Критерії оцінки агресивності скломаси по відношенню до шамоту</b>	
0	взаємодії немає
1	взаємодії розплаву з вогнетривом слабке
2	під час варіння відбувається потоншення тигля з ризиком витікання розплаву
3	скломасу зварити неможливо, відбувається роз'їдання тигля і витікання розплаву
<b>Критерії оцінки рельєфу поверхні отриманих матеріалів (чисельник - скло, знаменник - зразок після кристалізації)</b>	
0	поверхню ідеально вогненно-полірована
1	поверхню злегка хвиляста
2	поверхня має шорстку текстуру
3	дуже сильне викривлення поверхні
<b>Оцінка декоративних властивостей отриманих матеріалів (чисельник - скло, знаменник - зразок після кристалізації)</b>	
0	декоративних властивостей немає
1	декоративні властивості слабкі
2	декоративні властивості на рівні відомих
3	особливі декоративні властивості відрізняються новизною

Результати оцінки технологічних та декоративних властивостей отриманих матеріалів зведені в таблицю 3. Враховуючи всі характеристики зразків можна констатувати, що для виробництва лицювальних матеріалів можуть бути використані склади № 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15. Оптимальними складами є 5, 6, 10 та 15<sup>20</sup>.

Таблиця 3

<sup>20</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. Питання хімії та хімічної технології. 2021, No. 2, pp. 95–103. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103

### Зведені результати оцінки технологічних та декоративних властивостей отриманих матеріалів

Номер точки	Склад, %			Варильна здатність	Агресивність розплаву	Рельєф поверхні	Декоративні властивості
	«Х»	Na <sub>2</sub> O	MgO				
1	100	0	0	0	0	0/0	0/0
2	90	10	0	2	0	0/1	1/0
3	90	0	10	0	0	0/0	0/0
4	80	20	0	3	1	0/2	1/0
5	80	10	10	3	1	0/1	1/1
6	80	0	20	3	2	0/0	1/3
7	70	30	0	3	1	1/3	0/0
8	70	20	10	3	1	0/1	1/0
9	70	10	20	3	1	0/1	1/0
10	70	0	30	3	2	0/1	1/3
11	60	40	0	3	1	1/3	0/0
12	60	30	10	3	1	0/2	1/0
13	60	20	20	3	1	0/1	1/1
14	60	10	30	0	1	1/0	1/0
15	60	0	40	3	2	0/3	1/2

На рис. 8 приведені фотографії отриманих матеріалів, які можуть бути використані як лицювальна плитка.



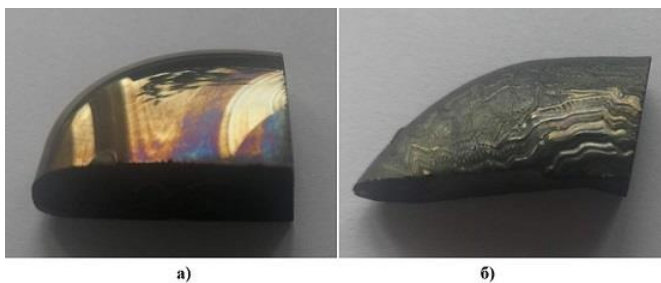
**Рис. 8. Зразки отриманих склокристалічних матеріалів**

Макрохвиляста структура поверхні з градацією кольорності обумовлена високою схильністю складів системи ((Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-FeO)-SiO<sub>2</sub>)-MgO-Na<sub>2</sub>O до макроліквації.

Отримані матеріали з незвичайними декоративними властивостями, що обумовлені особливими фізико-оптичними властивостями найтоншої поверхневої плівки, яка утворюється в ході направленої кристалізації. Товщина отриманої плівки співрозмірна з довжинами хвиль видимого діапазону світла. Про це свідчить ефект ірізації за рахунок інтерференції світла (рис. 9, а). У деяких випадках поверхня зразків мала металічний блиск. Такий ефект можна пояснити кристалізацією в поверхневому шарі гематиту, який має показник

заломлення  $n \approx 3$ , який обумовить високий коефіцієнт відбиття. Таким чином, хвилястість поверхні, колірна палітра і блиск обумовлює декоративні властивості отриманих матеріалів.

Після кристалізації отриманого скла поверхня зразка набуває виражених рельєфних форм. Явище можна пояснити попередньою макроліквіацією розплавів та різною розчинністю оксидів феруму в макрогетерогенному розплаві. В результаті на поверхні виробу можуть утворюватися рельєфні візерунки. Колірна гама отриманих матеріалів має відтінки чорного, сірого, червоно-бурого, зеленого, що свідчить про присутність у їх поверхневому шарі залізовмісних кристалічних фаз (рис. 5, 6)<sup>21</sup>.



**Рис. 9. Зразки скла (а) та склокристалічного матеріалу (б)**

Таким чином, проведені дослідження підтвердили, що відходи рудозбагачення можуть бути утилізовані за скляною технологією для отримання облицювальних матеріалів з декоративним ефектом.

## **ВИСНОВКИ**

Проведено комплексне дослідження склоутворення у системах  $((\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{-SiO}_2\text{-MgO-Na}_2\text{O})$ . Вивчено вплив хімічного складу на варильні та формувальні характеристики скляної маси. Встановлені оптимальні склади шихти, визначено температури відпалу і розм'якшення скла.

Вивчена кристалізаційна здатність складів у системах  $((\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3)\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$  та встановлені оптимальні режими термообробки з метою отримання склокристалічних матеріалів та вивчено вплив хімічного складу на властивості скла та склокристалічних матеріалів. Закристалізовані зразки

---

<sup>21</sup> Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. Питання хімії та хімічної технології. 2021, No. 2, pp. 95–103. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103

покращували свої декоративні властивості у порівнянні з вихідними. Виключення складали зразки з високим вмістом  $\text{Na}_2\text{O}$ .

В продуктах кристалізації скла широко представлені мінерали на основі оксидів феруму: гематит, магнетит, фєро-магнезїальна шпїнєль. Також присутні силїкати кальцїю і маґнїю: дїопсид та клїноєнстатит. У висококремнеземистих складах в продуктах кристалізації пристунїй також кристобалїт.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили, що відходи рудозбагачення можуть бути утилізовані за скляною технологїєю для отримання облицювальних матеріалів з декоративним ефектом.

## АНОТАЦІЯ

У роботі досліджена можливість утилізації відходів збагачення залїзних руд за скляною технологїєю. Розроблено склади нових склокристалїчних матеріалів з високими технологїчними та декоративними властивостями. Вивчено вплив добавок  $\text{MgO}$  та  $\text{Na}_2\text{O}$  на технологїчні характеристики склоподїбних та склокристалїчних матеріалів на основі хвостів рудозбагачення.

Визначено оптимальні температури синтезу, відпалу та кристалізації зразків скла у системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$ . Вони складають  $1450 \pm 10^\circ\text{C}$ ,  $500\text{-}600^\circ\text{C}$  та  $700\text{-}800^\circ\text{C}$  відповідно.

Дилатометричні дослідження підтвердили, що найбільш тугоплавкими є висомагнезїальні склади. Фронт ізолїній  $T_g$  і  $T_r$  знижуються в бїк зменшення вмісту  $\text{MgO}$ , а далї від сторони трикутника «Х»- $\text{MgO}$ . Сильну флюсуючу дїю надає  $\text{Na}_2\text{O}$ . Величини ТКЛР отриманих зразків змінюється в дїапазонї  $(80\div 140) \cdot 10^{-7}, \text{K}^{-1}$ .

В продуктах кристалізації широко представлені мінерали на основі оксидів феруму. В системі  $((\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-FeO})\text{-SiO}_2)\text{-MgO-Na}_2\text{O}$  присутні гематит, магнетит, фєро-магнезїальна шпїнєль, а також силїкати кальцїю і маґнїю: дїопсид та клїноєнстатит. У висококремнеземистих складах в продуктах кристалізації пристунїй також кристобалїт.

Відходи рудозбагачення можуть бути утилізовані за скляною технологїєю для отримання облицювальних матеріалів з декоративним ефектом.

## Лїтература

1. Calas G., Petiau J. Coordination of iron in oxide glasses through high-resolution K-edge spectra: information from the pre-edge. *Solid state communications*. 1982. 48(7). P. 625–629.
2. Chen S.H., Soh A.K. The capillary force in micro- and nano-indentation with different indenter shapes. *International Journal of Solids and Structures*. – 2008. V.45. P. 3122–3137.

3. Martins, N. P., Srivastava, S., Simão, F. V., Niu, H., Perumal, P., Snellings, R., Habert, G. Exploring the potential for utilization of medium and highly sulfidic mine tailings in construction materials: A review. *Sustainability*. 2021. 13(21). P. 12150.
4. Matinde, E., Simate, G.S., Ndlovu, S. Mining and metallurgical wastes: a review of recycling and re-use practices. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2018. 118(8). P. 825-844. <https://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/2018/v118n8a5>
5. Moosavi-Khoonsari, E., Jung, IH. Critical Evaluation and Thermodynamic Optimization of the  $\text{Na}_2\text{O-FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  System. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2016. 47. P. 291–308. <https://doi.org/10.1007/s11663-015-0504-x>
6. Nabarro F-R-N., Shrivastava S., Luyckx S-B. The size effect in microindentation. *Philosophical Magazine*. 2006. Vol. 86. No. 25–26. P. 4173–4180.
7. Piatak N. M., Parsons M. B., Seal II R. R. Characteristics and environmental aspects of slag: a review. *Applied Geochemistry*. 2015. Vol. 57. P. 236–266.
8. Plemiannikov M., Zhdaniuk N. Determination of the influence of temperature, concentration of ferric oxides and oxidative conditions of glass boiling on the displacement of the equilibrium of ferric oxides  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \leftrightarrow \text{FeO}$ . *Technology Audit and Production Reserves*, 2023. 3(1(71)). C. 10–14. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.283267>
9. Губіна В.Г., Кадошніков В.М., Заборовський В.С., Кузенко С.В., Горлицький Б.О., Бондаренко Г.М. Вивчення можливості використання відходів збагачення залізистих кварцитів в народному господарстві. 36. наук. пр. ІГНС НАН України «Геохімія та екологія». Вип.14. К. 2007. С. 156–165.
10. Жданюк Н.В., Племянніков М.М. Новий склокристалічний матеріал на основі відходів металургійних виробництв. Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій : праці міжнар. наук.-практ. конф., присвяченої 80-річчю кафедри хімії ХНУМГ ім. О. М. Бекетова (Харків, 7–8 листоп. 2019 р.) Харків, 2019. С. 126.
11. Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Вивчення можливості утилізації відходів металургійних виробництв для отримання склокристалічних матеріалів. *Norwegian Journal of development of the International Science*. 2020. № 42 (1). P. 51–58.
12. Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Феросилікатні склокристалічні матеріали на основі відходів рудозбагачення. *Питання хімії та хімічної технології*. 2021. No. 2. С. 95–103. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-135-2-95-103

13. Племянніков М.М., Жданюк Н.В. Фізична хімія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів : підручник для студентів, які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних керамічних матеріалів». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2022. 152 с.

**Information about the authors:**

**Zhdaniuk Nataliia Vasylivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Senior Lecturer at the Department of Chemical Technology  
of Ceramics and Glass

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03100, Ukraine

**Plemiannikov Mykola Mykolaiovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at of the Department  
of Chemical Technology of Ceramics and Glass

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03100, Ukraine

## **INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR JOINT PURIFICATION OF HIGHLY MINERALIZED MINE WATER AND BOILER-ROOM EMISSIONS**

**Kovrov O. S., Kulikova D. V.**

### **INTRODUCTION**

Industrial wastewater from mining and metallurgical enterprises is a large-scale source of water pollution. Suspended solids, salts heavy metals, petroleum products, and other substances contained in the polluted water can further accumulate in water bodies and aquatic organisms, causing negative environmental processes of pollution and migration.

Some promising methods for wastewater treatment from coal industry enterprises are demineralization, desalting, ultrafiltration, reverse osmosis, etc. The use of these methods makes it possible to reduce the content of mineral and salt components not only to the requirements for discharge into surface water bodies but also to use for technical and economic purposes and household needs. The reuse of treated wastewater for technical water supply will eliminate the existing shortage of freshwater resources.

The problem of reducing technogenic pressure on the hydrosphere is particularly important in the mining industry since highly mineralized waters from mining enterprises significantly disrupt the stability of aquatic ecosystems. The proposed scheme for the purification of highly mineralized mine waters using ion exchange and sedimentation methods will allow for maximum extraction of salt components from mine waters, as well as cleansing of gas emissions from an industrial boiler house. The introduction of a mine water treatment scheme at a mining enterprise will make it possible to eliminate as much as possible excess discharges of sulfates, chlorides, and other pollutants, and use purified water in technological processes or transfer it to secondary water users for technical needs.

### **1. Analysis of the relevant research and formulating the purpose of the study**

Many works have been devoted to the influence of highly mineralized mine waters on surface water bodies. Mine waters have a significant impact on the state of surface water bodies and groundwater both locally and on a regional scale, which is reflected in various environmental risk assessments<sup>1</sup>, although the methodology of such approaches is not always clear.

---

<sup>1</sup> Gorova A., Pavlychenko A., Borysovs'ka O., Krups'ka L. The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions. Annual  
166



In the paper<sup>2</sup>, specific indicators characterizing the assimilation capacity of water resources in the Dnepropetrovsk region are analyzed. It has been established that for the water basin of the Dnipro River including tributaries of Samara River and Vovcha River, this indicator is characterized as “high”, which indicates significant pollution of surface water bodies with mine waters. It is not clear from the article how the mineral or organic pollution of rivers affects the calculated indicators.

Mine waters can have a negative impact even after mining operations cease. Thus, after the closure of the mine, the groundwater level rises, causing soil contamination with heavy metals and minerals<sup>3</sup>.

The well-known phenomenon of mine acid drainage, associated with the oxidation of  $\text{FeS}_2$  in mine waters and waste, and the release of  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{H}^+$ , deserves special attention. Chemical reactions contribute to a decrease in pH and leaching of heavy metals with subsequent pollution of surface water bodies<sup>4</sup>.

Due to the urgency of the problem of mine water, various improved treatment facilities are proposed, primarily modified mechanical settling tanks and sedimentation facilities<sup>5 6</sup>, the efficiency of which reaches 96-98%.

Vacuum membrane technologies with distillation are widely used, aimed at removing particles and dissolved impurities by evaporation and condensation, which imitates natural processes<sup>7</sup>.

Combined processes of direct and reverse osmosis, the effectiveness of which depends on the effective configuration of the equipment, the chemical composition, and the structure of the membranes, have become classical methods for treating highly mineralized mine waters<sup>8</sup>.

---

Scientific Technical Collection – Mining of Mineral Deposit. 2013. P. 207–209. <https://doi.org/10.1201/b16354>.

<sup>2</sup> Kulikova D., Kovrov O., Buchavy Y., Fedotov V. GIS-based Assessment of the Assimilative Capacity of Rivers in Dnipropetrovsk Region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. № 27(2), P. 274–285. <https://doi.org/10.15421/111851>.

<sup>3</sup> Arefieva O., Nazarkina A., Gruschakova N., Skurikhina J., Kolycheva V. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7(1). P. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.001>.

<sup>4</sup> Jönsson J., Jönsson J., Lövgren L. Precipitation of secondary  $\text{Fe(III)}$  minerals from acid mine drainage. *Applied Geochemistry*. 2006. Vol. 21, № 3, P. 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.12.008>.

<sup>5</sup> Kolesnyk V., Kulikova D., Kovrov S. In-stream settling tank for effective mine water clarification. *Mining of Mineral Deposits*. 2013. Vol. 1, 285–289. <https://doi.org/10.1201/b16354-52>.

<sup>6</sup> Kovrov O., Kulikova D. Improvement of the mine water purification efficiency via modified settling tank. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2022. № 23(1). 65–75. <https://doi.org/10.12912/27197050/142943>.

<sup>7</sup> Sivakumar M., Ramezani-pour M., O'Halloran G. Mine Water Treatment Using a Vacuum Membrane Distillation System. *APCBEE Procedia*. 2013. Vol. 5, P. 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.028>.

<sup>8</sup> Thiruvengkatachari R., Su S., Cunnington M. 14-FO-RO for mining wastewater treatment. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes Reverse and*

A study<sup>9</sup> investigated the separation of uranium from other anions present in acidic mine water using batch and column ion exchange techniques.

The anthropogenic load on water reservoirs in the region has reached a level that threatens the population's health. A cause-and-effect relationship between the qualitative and quantitative state of the surface waters of the Samara River and certain diseases of the population living in the Western Donbas region has been presented in the paper<sup>10</sup>.

The analysis of recent studies and publications indicates that the problem of highly mineralized mine water is one of the key ones in the range of environmental activities of mining enterprises.

Identification of previously unresolved parts of the general problem to which the article is devoted. In practice, the application of the above methods to reduce the salinity of mine waters is very problematic for two reasons. Firstly, significant capital and operating costs for the main technological processes of water treatment and the high cost of reagents. Secondly, the disposal of salt products of water treatment is a practically insoluble problem due to the lack of specialized landfills for the disposal of mineral components of mine water.

Considering the above-presented research, there is a need to search for alternative, unique, and economically feasible engineering solutions in the field of purification of highly mineralized mine waters and disposal of salt sediments.

*The purpose of the study* is to substantiate a comprehensive technology for the purification of mine waters and boiler room gaseous emissions using the ion exchange sorption method.

## **2. General information about the enterprise for design implementation**

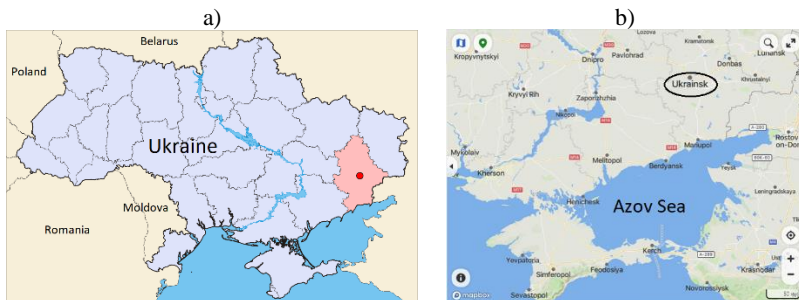
A coal mine "Ukraina" of the State Enterprise "Selydivvugillya" is located in the City of Ukrainsk (Donetsk region, Eastern Ukraine) and was put into operation in 1963 with a production capacity of 1200 thousand tons of coal per year (Fig. 1).

---

Forward Osmosis: Principles, Applications, Advances. 2020. P. 325–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00014-9>.

<sup>9</sup> Queiroz Ladeira A.C., Gonçalves C.R. Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. Journal of Hazardous Materials. 2007. Vol. 148, № 3, P. 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.003>.

<sup>10</sup> Основні технічні рішення для будівництва пілоотної установки для хімічної очистки стічних вод на Східному гірничозбагачувальному комбінаті: Проект. Жовті Води: Український науково-дослідний та проектно-розвідувальний інститут промислової технології, 2002. Арх. № 14183. 126 с.



**Fig. 1. General map of Ukraine (a) and location of the Ukrainsk City (b) in Donetsk Oblast of Ukraine. The population of Ukrainsk is 10,655 residents (2022).**

Source: <https://mapcarta.com/13727220>

The most significant source of air pollution at the mine is an industrial boiler house with a capacity of 16 Gcal/h of heat in the form of steam with a pressure of 0.3-0.5 MPa. The boiler room has 4 boilers of type DKVR-6.5/13. The maximum coal consumption is 8674 kg/h, 15.6 thousand tons/year. To purify exhaust flue gases, battery cyclones of the BC type are used with an efficiency of 80-86% to reduce emissions of solid dust particles. After partial purification, the flue gases are released into the atmosphere through a brick chimney with a height of 45 m and a mouth diameter of 1500 mm<sup>11</sup>. Emissions of pollutants into the atmosphere from the industrial boiler house of the Ukraine mine are given in Table 1.

Table 1

**Gross emissions from the mine boiler house**

Name of pollutants	Maximum permissible emission rates		Actual pollutant emission rates	
	g/s	t/year	g/s	t/year
Dust with SiO <sub>2</sub> (20-70%)	19.6	56.89	9.4	31,878
Sulfur dioxide (SO <sub>2</sub> )	11.9	356.1	9.7	243
Carbon monoxide (CO)	11.54	34.25	41.4	49.66
Nitrogen oxides (NO <sub>x</sub> )	5.43	18.11	8.5	23,355

Analyzing Table 1, it can be noted that the most significant factors of negative impact on the state of the atmosphere are emissions of solid dust and

<sup>11</sup> Проект шахти «Україна» ДП «Селидівугілля». Том. 1 Пояснювальна записка. Книга 4 «Охорона навколишнього природного середовища». Дніпропетровськ: ДП «Дніпродіпрошахт», 1999. 127 с.

sulfur dioxide, which is due to the high sulfur content of coal. At the same time, gaseous substances are not captured<sup>12</sup>.

### **3. Qualitative and quantitative characteristics discharged mine water**

The mineralization of mine waters primarily originates from the mineral content of groundwater, the chemical composition of which forms under the combined influence of various factors: lithological and mineralogical composition of rocks, recharge conditions of aquifers and intensity of water exchange, climate, anthropogenic factors, etc. Before underground water enters the mine, the chemical composition is formed by salts washed out during infiltration of surface waters containing free carbon dioxide and oxygen, which increase the solubility of calcium and magnesium carbonates. As a result, the water is mineralized by sulfates and chlorides after their contact with easily soluble rocks such as gypsum, halite, and mirabilite. When sodium bicarbonate water is mixed with calcium sulfate water, sodium sulfate water is formed.

The underground waters of the minefield are confined to sediments of Quaternary, Neogene, and Carboniferous ages. Groundwater of coal deposits has hydro-chemical zoning. Sulfate-sodium-calcium waters with a mineralization of 2.6-3.1 g/l are developed to a depth of about 200 m. Deeper, up to 300-350 m, sulfate-chloride-sodium-calcium waters are common, with a mineralization of 2.5-3.1 g/l. Chloride-sodium-calcium waters appear even lower.

Mine water is pumped to the surface of the mine by two drainage units. The total inflow is up to 350 m<sup>3</sup>/hour. Mine water is used for the production needs of the “Ukraine” processing plant and the technical water supply of the mine, and the rest is discharged through the outlet collector into the clarification pond and then into the storage pond for settling suspended substances and further discharged into the Vovcha River basin, the tribute of Dnipro River.

Table 2 presents the complete chemical composition of mine waters discharged into a surface water basin of Vovcha River in comparison with maximum permissible concentrations (MPC) for general and fishery standards<sup>13</sup>.

In 1999, the coal mine “Ukraine” discharged 1219.1 thousand m<sup>3</sup> of industrial wastewater containing substances whose concentrations significantly exceeded the maximum permissible concentration for fishery reservoirs.

The average volume of mine water is 1052 thousand m<sup>3</sup>/year. Considering the use of mine water for the production needs of the mine, discharge into the

---

<sup>12</sup> Проект нормативів гранично допустимих викидів шахти «Україна» ДП «Селидіввугілля». – Маріуполь: Громадське бюро з проектування та налагодження природоохоронної техніки «Еколог», 2001. 96 с.

<sup>13</sup> ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ, 2019. 96 с.

Vovcha River (Dnipro River basin) is 2327 thousand m<sup>3</sup>/year. The qualitative composition of mine waters indicates excess levels of chlorides and sulfates, the high concentrations of which are due to the groundwater's natural content.

Table 2

**Chemical content and discharge of mine water**

Pollutants	MPC, mg/l		Discharge rates	
	Common-use water bodies	Fishery water bodies	2020	
			mg/l	t/year
1. Weighted substances	10.0	10.0	20.0	24.2
2. pH	6.5-8.5		7.6	
3. COD	15.0	-	8.36	10.1
4. BOD full.	6.0	3.0	3.94	4.8
6. Ammonium salt.	-	0.5	1.0	1.2
7. Nitrites	3.3	0.08	0.08	0.1
8. Nitrates	45.0	40.0	5.6	6.8
9. Dry residue	1000	1000	3391	4094
10. Chlorides	350	300	467	564
11. Sulfates	500	100	1419	1713
12. Mercury	0.0005	0.00001	n/a	n/a
13. Cadmium	0.001	0.0005	n/a	n/a
14. Lead	0.03	0.1	0.039	0.047
15. Arsenic	0.05	0.05		
16. Chrome (VI)	0.05	0.001	0.04	0.048
17. Iron (total)	0.3	0.005	0.3	0.366
18. Manganese	0.1	0.01	0.117	0.141
19. Zinc	1.0	1.0	0.03	0.036
20. Nickel	0.1	0.01	0.028	0.034
21. Copper	1.0	0.001	0.012	0.015
22. Phenols	0.001	0.001	0.018	0.0022
24. Petroleum products	0.3	0.05	0.64	0.773
25. Potassium			12.0	12.6
26. Sodium			500.0	526.0
27. Calcium			300.0	315.6
28. Magnesium			175.0	184.1
29. Hardness (mg-eq/l)			29.3	30.8

#### 4. Development of the technological scheme for joint purification of mine water and boiler room gaseous emissions

Within the framework of this article, a comprehensive solution to the environmental problems of the mine is proposed through the introduction of chemical water treatment (CWT) technology for a boiler room. The main technical solutions for the pilot industrial chemical water treatment plant of the boiler at the coal mine "Ukraine" of the State Enterprise "Selydivugillya" were made based on the initial data.

Technological facilities of the water treatment plant are designed for the purification of mine waters to a quality that allows the use of purified water for feeding steam boilers and domestic needs of the mine and the City of Ukrainsk, irrigation of farmlands and discharge into fishery reservoirs with associated purification of flue gases from dust, sulfur dioxide  $\text{SO}_2$ , nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  and carbon dioxide  $\text{CO}_2$ .

The CWT technology of a mine boiler house includes the following buildings and structures (Fig. 2): a one-story treatment building with overall dimensions of  $42 \times 18 \text{ m}^2$  with an evaporation facility, a laboratory and auxiliary premises; radial settling tank-thickener with a diameter of 25 m; two containers with a volume of  $40 \text{ m}^3$  each for receiving and storing 42% of sodium hydroxide solution; tank for washing water with a volume of  $200 \text{ m}^3$ ; ion exchange and washing columns; plate absorbers for adjusting the pH of the purified water, as well as for preparing a regenerating solution (8% sodium bicarbonate  $\text{NaH}_2\text{CO}_3$ ) by absorbing carbon dioxide  $\text{CO}_2$  with a NaOH solution; pump equipment; pipeline rack from the treatment building to the boiler room and radial thickener.

Two options for recycling liquid waste generated because of purification using the ion exchange method are considered. To process liquid salt waste, the first option provides for an evaporation plant and a landfill for dry salt disposal. According to the second option, an evaporation pond with a capacity of  $2500 \text{ m}^3$  with an operating period of 10 years is provided for storing liquid wastes<sup>10</sup>.

The technological scheme for purifying mine water is based on the ion exchange method. Mine water from the existing horizontal three-section settling tank ( $V = 700 \text{ m}^3$ ) in the amount of  $120 \text{ m}^3/\text{h}$  is supplied by pumps to the boiler room water treatment plant. The mine water purification technology includes the following technological operations.

1. *Sorption of anions ( $\text{Cl}^-$  and  $\text{SO}_4^{2-}$ ) in a sorption pressure column (SPC) on an AM brand anion exchanger.* The operation of anion exchange extraction of chloride and sulfate ions is carried out in a quasi-continuous cycle (with the movement of portions of anion exchange resin through the regeneration and washing zones into the working area) in devices with an upward flow of water and solutions. Main characteristics of the ion exchange process: anion exchanger capacity –  $700 \text{ mEq/l}$ ; filtration rate –  $20 \text{ m/hour}$ ; layer height is 6 m. Water from the column is supplied for the precipitation of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  cations, and the saturated anion exchanger is used for regeneration.

2. *Regeneration of the anion exchanger with an 8% solution of sodium bicarbonate  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  in a countercurrent ion exchange column (CIEC).* Main characteristics of the ion exchange process: anion exchanger/solution ratio = 1:1.5; filtration speed –  $2 \text{ m/hour}$ ; layer height is 6 m. The regenerative solution from the column goes to an evaporation unit (Option 1) or to an evaporation pond (Option 2), and the anion exchanger goes to washing.

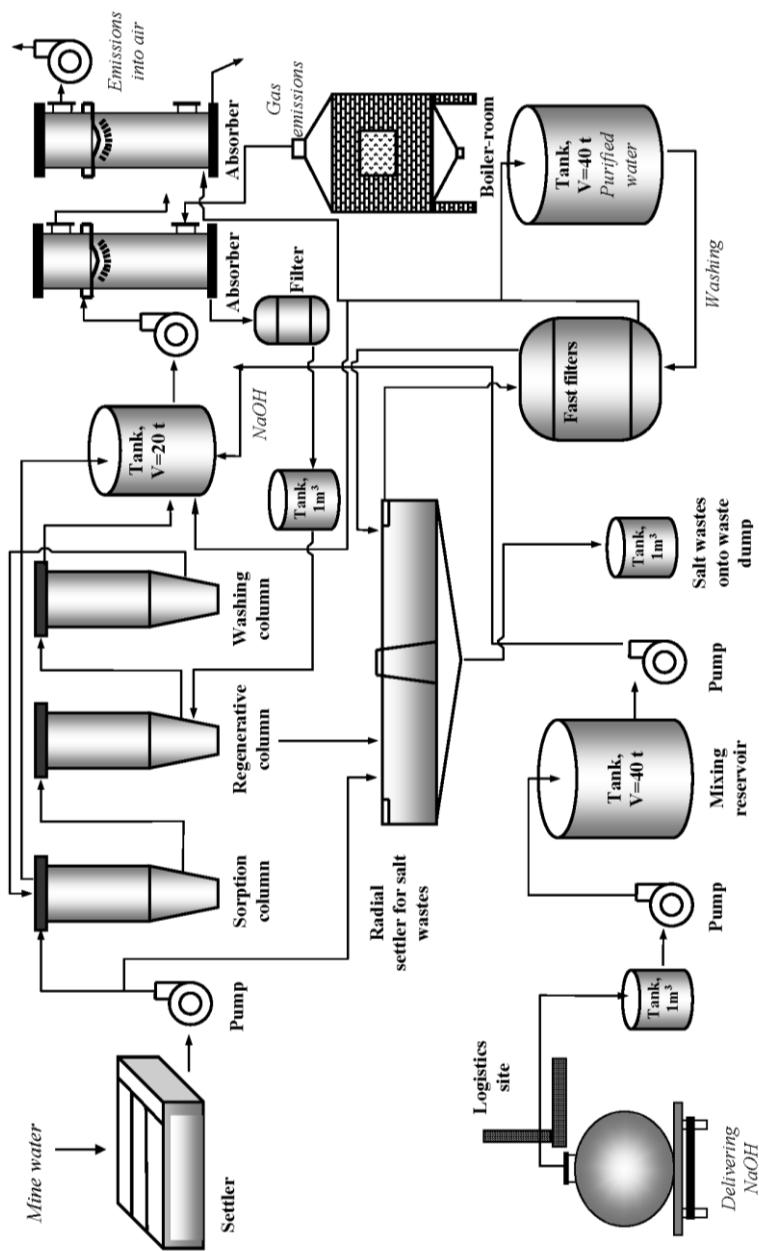


Fig. 2. Technological scheme for joint purification of mine water and boiler room gaseous emissions

3. *Washing the anion exchanger with purified water in the CIEC column.* Main characteristics of the process: filtration rate – 10–15 m/hour; washing time – 20–30 minutes. The washed anion resin is returned to the ion exchange column for sorption, and the wash water is used to prepare a regenerating solution of sodium bicarbonate  $\text{NaH}_2\text{CO}_3$ .

4. *Precipitation of hardness cations  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  from water with a 42% NaOH solution in a peripherally driven thickener ( $D=25\text{ m}$ ), followed by settling of the water.* The water that has passed the working zone of the ion exchange installation is supplied to the alkalization operation to pH values of 11.5–11.7, which ensures the effective formation of precipitates of magnesium hydroxide  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  and calcium carbonate  $\text{CaCO}_3$ . Main characteristics of the process: process pH – 11.5–11.7; the rate of precipitation of suspensions is 0.5 mm/s. The solid phase after settling the suspension can be discharged ( $7.5\text{ m}^3/\text{hour}$ ) or mixed with the spent regenerate of the sorption unit (to increase the pH value of the resulting suspension and, accordingly, the filtrate undergoing the evaporation operation). Alkalinization is carried out in a mixing tank, from which the suspension is sent to the settling operation and then to filtration. The last two operations are carried out respectively in a radial settling tank and a clarification filter with quartz sand or expanded clay.

5. *Control filtration of suspended matter in rapid filters loaded with clay or anthracite.* Filtration speed – 10 m/h. The sludge from the thickener is periodically pumped out to the mine dump.

6. *Adjustment of pH of purified water using flue gases from the boiler room in a plate absorber.* Water filtered from suspended particles (no more than 1–5 mg/l) with a pH of 11.5–11.7 is supplied to the stage of neutralization with carbon dioxide contained in the flue gases of the boiler room. The operation is carried out in a spray absorber equipped with perforated or tubular type sink plates. For preliminary purification of boiler room flue gases from sulfur and nitrogen oxides, an absorber of a similar type and design is provided, where a 5–10% NaOH solution is used as an absorption liquid. The gas mixture leaving this absorber enters the inlet of the second absorber. As a result of the reaction of  $\text{CO}_2$  and NaOH, a 5–10% solution of  $\text{NaH}_2\text{CO}_3$  is formed, which enters the tank for storing the regenerating solution and is used for desorption of chloride and sulfate ions in the ion exchange extraction of mine water anions.

The regenerate of each block of the treatment plant in the amount of  $10\text{ m}^3/\text{h}$  is concentrated in a three-stage evaporation unit.

Water with pH 7.5–8.0 at the outlet of the absorber is sent to the consumer to feed DKVR 6.5/13 steam boilers or, after mixing with the original mine water, it is used to irrigate farmlands.

7. *Water disinfection is carried out by active chlorine.*

The results of the calculation of the chemical treatment technology by the ion exchange method, carried out in accordance with the current standards for the design of industrial wastewater treatment facilities, are presented in Table 3.

Considering that the boiler house provides for wet cleaning with two absorbers with a cleaning efficiency of 99%, solid dust in the amount of 56.89 tons/year will be captured and transported to the rock dump in the form of sludge.



The use of an anion exchange unit will reduce the content of sulfates and chlorides in purified mine water by 98-99% (according to design indicators, the total content of these ions will not exceed 50 mg/l). Considering the efficiency of the ion exchange unit with a highly basic anion exchanger of the AM brand, the discharge of sulfates will decrease by 1460.2 tons/year, chlorides – by 455.7 tons/year.

Predicted results of the effectiveness of the use of CWT technology for a boiler room emissions and mine water treatment are presented in the Table 3.

To mix  $\text{HCO}_3^-$  ionized water with caustic soda solution, it is recommended to use two tanks equipped with mixers that ensure uniform distribution of the introduced alkali solution in the shortest possible time period. The volume of each tank is around 60-70  $\text{m}^3$ .

The settling of the resulting suspension and removal of calcium and magnesium hydroxide sludge is carried out in a radial settling tank with a central drive and a diameter of 25 m (the rate of precipitation of the suspended mineral components  $u_0$  is 0.5 mm/s).

Table 3

**Calculation results of ion exchange devices  
for the boiler room chemical treatment plant**

No.	Indicators	Units	Indicator values
1.	<i>For sorption of anions:</i>		
	– productivity of purified water, $Q$	$\text{m}^3/\text{h}$	120
	– total content of $\text{Cl}^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$ , $\sum C_{\text{anions}}$	$\text{g}/\text{m}^3$	2060
	– working exchange capacity of anion exchanger, $a$	$\text{g-eq}/\text{m}^3$	700
	– filtration rate of source water, $W_f$	$\text{m}/\text{h}$	25
	– residence time of the anion exchanger in the column, $t_0$	h	5
	– ratio of the height of the anion exchanger layer in the sorption column to its diameter, $B_0$	dimension-less	2.5
2.	<i>For anion desorption:</i>		
	– productivity of regenerating solution, $Q_{\text{reg}}$	$\text{m}^3/\text{h}$	10
	– concentration of the regenerating solution $\text{NaH}_2\text{CO}_3$ , $C$		
	– filtration rate of $\text{NaH}_2\text{CO}_3$ solution, $W_p$	%	8
	– residence time of the anion exchanger in the regeneration column, $t_r$	$\text{m}/\text{h}$	3
	– ratio of the height of the anion exchanger layer in the column to its diameter, $B_p$	h	4
		dimension-less	3.75
3.	<i>To wash the anion resin:</i>		
	– washing water productivity, $Q_{\text{out}}$	$\text{m}^3/\text{h}$	15-20
	– filtration rate of washing water (at a time of supply to the column that ensures the volumetric flow rate of washing water), $W_{\text{out}}$	$\text{m}/\text{h}$	10-15
	– ratio of the height of the anion exchanger layer to the diameter of the column, $V$	b/r	3.75
	– residence time of the anion exchanger in the column, $t$	h	4

Clarified water from the sump goes to a mechanical filter filled with quartz sand (expanded clay, crushed anthracite). The total filtration area is  $13 \text{ m}^2$  (at a filtration rate of  $10 \text{ m/h}$ ), and the number of filters is 3. Considering the total wastewater flow, for one block of the treatment plant it is recommended to use three clarification filters with a diameter of  $2.6 \text{ m}$  with a backfill height of  $1.0 \text{ m}$ .

The filtrate of a mechanical filter with a suspended particle content of no more than  $1\text{--}1.5 \text{ mg/l}$  and a pH value of  $11.5\text{--}11.7$  is supplied to the operation of its acidification with  $\text{CO}_2$ -containing gases. Acidification is carried out in two absorbers by contacting the NaOH absorption solution with a gas mixture that has undergone the first stage of purification from ash and sulfur oxides. The diameter of each absorber is  $0.75 \text{ m}$ , the height (from the nozzle to the drain mirror) is  $1.0 \text{ m}$ , the flue gas capacity ( $Q_{\text{gas}}$ ) is  $8000 \text{ m}^3/\text{h}$ , and the solution (water) capacity is  $40 \text{ m}^3/\text{h}$ . Gas residence time (in the zone of contact with the solution)  $0.3 \text{ s}$ . The number of failure plates is 3 pieces, located  $300\text{--}400 \text{ mm}$  from each other.

For the first stage of cleaning the exhaust flue gases of the boiler room from sulfur dioxide  $\text{SO}_2$  and nitrogen oxides  $\text{NO}_x$ , as well as obtaining a regeneration solution of sodium bicarbonate  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  with a concentration of  $8\text{--}10\%$ , an absorber of similar dimensions is used as at the stage of acidifying the filtrate of a mechanical filter. The total resistance on the gas line is  $250\text{--}300 \text{ mm}$  water column for three absorbers.

Each absorber unit for producing sodium bicarbonate solution and acidifying the filtrate is equipped with a special container with a stirrer.

Regenerates of the anion exchange unit for extracting mine water components in an amount of  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  contains the following compounds:

- chloride ions ( $\text{Cl}^-$ ) –  $7.45 \text{ kg/m}^3$ ;
- sulfate-ions ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) –  $10.0 \text{ kg/m}^3$ ;
- bicarbonate ions ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) –  $38.4 \text{ kg/m}^3$ ;
- sodium ions –  $24.0 \text{ kg/m}^3$ ;
- pH value –  $8.5$ .

The regenerate, constituting  $8\%$  of the total salts (or  $5.3\%$  of sodium bicarbonate), is subjected to a concentration operation in an evaporation plant (Option 1) or sent to an evaporation pond (Option 2).

To concentrate the specified solution with an initial sodium bicarbonate concentration of  $5\text{--}15\%$ , you can use a three-effect evaporation plant with a direct-flow evaporation scheme, an initial heating steam pressure of  $4 \text{ atm}$ , and  $t_0 = 143^\circ\text{C}$ .

## 5. Environmental impact assessment

The pilot industrial chemical water treatment plant for the boiler house proposed for use is an environmental protection facility to supply heat to the

enterprise, purified mine water is used as a coolant, which is currently discharged without treatment into the Vovcha River.

When implementing the project, emissions of boiler room flue gases into the atmosphere will be significantly reduced. As a result of the introduction of two-stage wet cleaning, ash, and dust are completely removed from flue gases, and acid oxides ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) are removed by 95-99%, which are converted into a liquid state in the form of slightly diluted acids.

The physicochemical composition of mine water before and after treatment is given in Table 4.

Table 4

**Physicochemical composition of mine water before and after treatment**

No.	Pollutants	Unit	Concentration, mg/l	
			Primary water	Purified water
1.	Suspended solids	mg/l	20.0	10.0
2.	pH value		7.8	7-8.5
3.	Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	mg/l	333	0.2-1.5
4.	Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	mg/l	267	
5.	Chlorides ( $\text{Cl}^-$ )	mg/l	465	
6.	Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	mg/l	1490	25
7.	Salinity	mg/l	3640	<1000
8.	Purified water performance	th. m <sup>3</sup> /year	-	3066
		m <sup>3</sup> /hour	-	350

Approximately 100 m<sup>3</sup>/h of the total amount of mine water is used for the technical needs of the mine, the rest is used in the warm season to irrigate farmlands, or it is discharged into the Vovcha River in cold time.

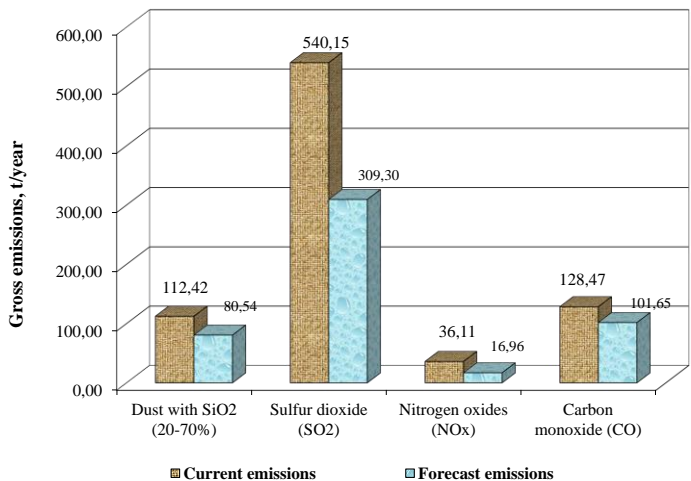
The boiler room reduces the concentration of harmful substances in the atmospheric air due to the capture of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , and solid particles of ash and soot when adjusting the pH of the water and preparing the regenerating solution.

The main waste stuff from the waste treatment plant is sulfates, chlorides, and calcium and magnesium carbonates. Two alternative options for storing and processing liquid waste are offered. Option 1 provides for the construction of an evaporation plant, an additional boiler unit with a capacity of 10 tons of steam per hour, and a landfill for storing dry salts. Option 2 provides for the construction of an evaporation pond with a capacity of 2,500 thousand m<sup>3</sup>. The sludge of calcium and magnesium carbonates from the radial thickener in the form of pulp is transported to the overburden dump located near the coal mine.

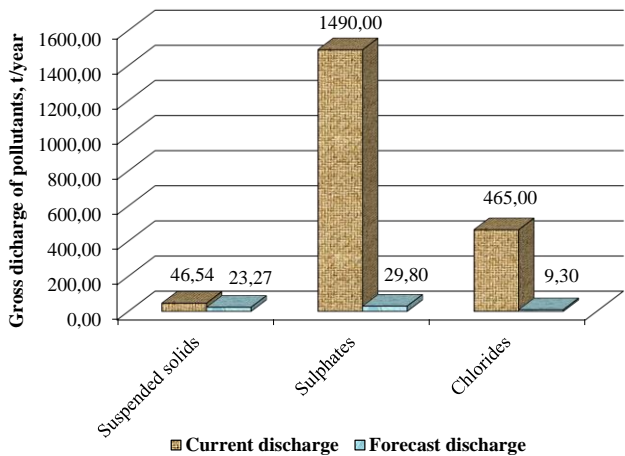
## 6. Qualitative composition of mine waters

The total amount of pumped mine water is 3066 thousand m<sup>3</sup>/year. Considering the use of mine water for the production needs of the processing plant and mine, discharge into the Vovcha River (Dnipro River basin) is 2327 thousand m<sup>3</sup>/year.

Finally, the application of the proposed technology of deep mine water treatment will decrease the gross emissions of pollutants into the atmosphere (Fig. 3) and minimize the discharge of mine water pollutants into the water streams (Fig. 4).



**Fig. 3. Gross emissions of pollutants into the atmosphere**



**Fig. 4. Gross discharge of pollutants with mine water into the surface water streams**

## CONCLUSIONS

Implementing a chemical water treatment project in practice can provide the following advantages:

- a significant reduction in the discharge of insufficiently treated wastewater into the hydrographic network with the maximum possible extraction of mineral components;
- the possibility of using purified water for the technological needs of the enterprise and feeding steam boilers of city boiler houses;
- reducing the use of drinking water in technological processes;
- associated cleaning of flue gases from a mine boiler house from gaseous components;
- a significant reduction in fees for environmental pollution.

The novelty of the research lies in the fact that the use of complex chemical water treatment technology will simultaneously reduce emissions of pollutants into the atmosphere from an industrial boiler house, as well as the content of sulfates and chlorides in treated mine water by 98-99%.

The proposed option for mine water purification significantly expands the boundaries of the traditional use of the ion exchange method. In the near future, the use of ion-selective sorbents will make it possible not only to purify wastewater, but also to selectively extract valuable components from it.

The presented research results are the basis for making engineering decisions in the field of reducing the discharge and purification of highly mineralized mine waters. The introduction of such technologies with the effective disposal of salt sediments will reduce the level of pollution of surface water bodies with mineral substances and increase the environmental efficiency of mining technologies.

## SUMMARY

Purification of industrial wastewater from mining and metallurgical enterprises is a complex and important task, especially in the context of ensuring environmental safety standards and rational use of water resources.

The paper presents the results of experimental studies conducted in laboratory conditions for conditioning of mine waters. Based on the design and calculations, the technological scheme for the treatment of mine water at the coal mine “Ukraine” of the State Enterprise “Selydivvugillya” is recommended, which consists in filtering the discharged mine water with high content of chloride and sulfate ions through a layer of highly alkaline  $\text{HCO}_3^-$ -anionite, treating the filtrate with sodium hydroxide solution ( $\text{NaOH}$ ), filtering of obtained suspension and acidifying the filtrate with gas mixture from the boiler-room that contains 3–8%  $\text{CO}_2$ . The regeneration of saturated anionite is carried out with a solution of sodium bicarbonate  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  obtained through absorption of  $\text{CO}_2$  by solution of  $\text{NaOH}$ . As a result of successive cleaning

operations, the calcium and magnesium ions in the water do not exceed 2-5 mg/l, chloride and sulfate ions – 50 mg/l respectively, which allows use of purified water for household and technological needs of the enterprise. When designing industrial treatment of mine water with a capacity of 350 m<sup>3</sup>/h, it is recommended to install three water purification units with a capacity of 120 m<sup>3</sup>/h for each block. Depending on the method of disposal of the generated salt wastes, two options are proposed for the disposal of wastewater regenerate: evaporation of salt wastes with further disposal of dry salts or alternative storage of liquid regenerate in an evaporation pond. Implementation of the proposed mine treatment flow chart will allow: significantly reduce the discharge of insufficiently treated mine water into a hydrographic network with maximum extraction of salt components; carry out associated purification of gas and dust emissions from the mine boiler-room from solid and gaseous emissions; use purified water for technological needs of the enterprise.

### Bibliography

1. Gorova A., Pavlychenko A., Borysovs'ka O., Krups'ka L. The development of methodology for assessment of environmental risk degree in mining regions. *Annual Scientific Technical Collection – Mining of Mineral Deposit*. 2013. P. 207–209. <https://doi.org/10.1201/b16354>.
2. Kulikova D., Kovrov O., Buchavy Y., Fedotov V. GIS-based Assessment of the Assimilative Capacity of Rivers in Dnipropetrovsk Region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. № 27(2), P. 274–285. <https://doi.org/10.15421/111851>.
3. Arefieva O., Nazarkina A., Gruschakova N., Skurikhina J., Kolycheva V. Impact of mine waters on chemical composition of soil in the Partizansk Coal Basin, Russia. *International Soil and Water Conservation Research*. 2019. № 7(1). P. 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.01.001>.
4. Jönsson J., Jönsson J., Lövgren L. Precipitation of secondary Fe(III) minerals from acid mine drainage. *Applied Geochemistry*. 2006. Vol. 21, № 3, P. 437–445. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.12.008>.
5. Kolesnyk V., Kulikova D., Kovrov S. In-stream settling tank for effective mine water clarification. *Mining of Mineral Deposits*. 2013. Vol. 1, 285–289. <https://doi.org/10.1201/b16354-52>.
6. Kovrov O., Kulikova D. Improvement of the mine water purification efficiency via modified settling tank. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2022. № 23(1). 65–75. <https://doi.org/10.12912/27197050/142943>.
7. Sivakumar M., Ramezaniapour M., O'Halloran G. Mine Water Treatment Using a Vacuum Membrane Distillation System. *APCBEE*

*Procedia*. 2013. Vol. 5, P. 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2013.05.028>.

8. Thiruvengatathari R., Su S., Cunningham M. 14-FO-RO for mining wastewater treatment. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes Reverse and Forward Osmosis: Principles, Applications, Advances*. 2020. P. 325–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816777-9.00014-9>.

9. Queiroz Ladeira A.C., Gonçalves C.R. Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 148, № 3, P. 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.003>.

10. Основні технічні рішення для будівництва пілотної установки для хімічної очистки стічних вод на Східному гірничозбагачувальному комбінаті: Проект. Жовті Води: Український науково-дослідний та проектно-розвідувальний інститут промислової технології, 2002. Арх. № 14183. 126 с.

11. Проект шахти «Україна» ДП «Селидіввугілля». Том. 1 Пояснювальна записка. Книга 4 «Охорона навколишнього природного середовища». Дніпропетровськ: ДП «Дніпродіпрошахт», 1999. 127 с.

12. Проект нормативів гранично допустимих викидів шахти «Україна» ДП «Селидіввугілля». – Маріуполь: Громадське бюро з проектування та налагодження природоохоронної техніки «Еколог», 2001. 96 с.

13. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ, 2019. 96 с.

#### **Information about the authors:**

**Kovrov Oleksandr Stanislavovych,**

Doctor of Technical Sciences,

Professor at the Department of Ecology

and Technologies of Environmental Protection

Dnipro University of Technology

19, Dmytro Yavornytskyi ave., Dnipro, 49005, Ukraine

**Kulikova Daria Volodymyrivna,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor at the Department of Ecology

and Technologies of Environmental Protection

Dnipro University of Technology

19, Dmytro Yavornytskyi ave., Dnipro, 49005, Ukraine

## ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОГОРОДЖУВАЛЬНОЇ ДАМБИ ХВОСТОСХОВИЩА «ДНІПРОВСЬКЕ» ГЕОФІЗИЧНИМИ МЕТОДАМИ

Пікареня Д. С., Орлінська О. В., Рудаков Л. М.

### ВСТУП

Хвостосховище «Дніпровське» є одним з об'єктів накопичення радіоактивних відходів колишнього Придніпровського хімічного заводу (м. Кам'янське Дніпропетровської області). Воно розміщене в заплаві р. Дніпро на правому березі на відстані приблизно 10 км вниз за течією від греблі Середньодніпровського водосховища. З півдня і заходу уздовж хвостосховища протікає р. Коноплянка, що впадає в р. Дніпро. Складування відходів переробки уранової сировини Придніпровським хімічним заводом (нині не працює) в хвостосховище проводилося з 1954 по 1968 р. способом гідронамиву. В результаті в ньому на сьогодні заскладовано біля 12 млн.т. відходів переробки уранових руд із загальною оціночною активністю приблизно  $1,4 \cdot 10^{15}$  Бк.

Дослідження, що проводилися в цьому районі багатьма колективами показують, що відбувається постійна фільтрація забруднених радіаційних розчинів з хвостосховища, які забруднюють ґрунти, рослини на прилеглих територіях, а також донні відкладення в р. Коноплянка.

Отже, вивчення технічного стану дамб та визначення шляхів міграції рідини є дуже актуальною науковою та практичною задачею.

### 1. Характеристика об'єкту дослідження

За будовою хвостосховище відноситься до рівнинно-наливного типу та було створено шляхом споруди замкнутого контуру захисних дамб, протяжність периметру яких біля 4 км. Дамби зведені на алювіальних пісках і суглинках і в процесі експлуатації хвостосховища нарощувалися. Тіло дамб складає різnorідний матеріал – від відходів коксохімічного виробництва (вуглисті шлаки, піски, супіски) і будівельного сміття (уламки цегли, цементний пил) до пиловатих і дрібних пісків і лесових суглинків і супісків. Протифільтраційні елементи, як в тілі дамби, так і в підставі чаші не закладені. Поверхня хвостосховища не спланована, поверхневий стік не організований. На низовому укосі дамби утворилися численні дрібні вимоїни, у її південній частині спостерігається просідання гребеня. Це свідчить про розвиток ерозійних процесів на поверхні дамби, які при одночасному підйомі рівня вод техногенного водоносного горизонту і розвитку суфозії, можуть призвести до її руйнування.



Складування відходів переробки уранової сировини в хвостосховище проводилося з 1954 по 1968 р. способом гідронамиву. В результаті в ньому на сьогодні закладовано приблизно 12 млн. т (5,8 млн. м<sup>3</sup>) відходів переробки уранових руд. Абсолютна відмітка гребеня дамби до 1959 року складала 57,45 м, потім після нарощування досягла 61,3–64,2 м. Висота дамб змінюється від 6,0 до 11,8 м, ширина по гребеню 5–35 м, ширина по підставі – 80 м. У даний час східна і північно-східна ділянка захисної дамби хвостосховища протяжністю до 1600 м засипана шаром відходів коксохімічного виробництва потужністю 7–22 м.

Хвостосховище в 1976–1989 р. перекрите шаром фосфогіпсу товщиною від 1-5 м поблизу дамб до 19 м в центральній і східній частині чаші, який запобігає надходженню в атмосферну радіоактивних речовин при вітровому пилінні.

З півночі до хвостосховища прилягають відстійники коксохімічного виробництва, зі сходу – відстійник металургійного виробництва ПрАТ «Камет-Сталь», північно-західна частина території хвостосховища засипана вуглистими шлаками та відходами металургійного виробництва без проекту (рис. 1).

Статус хвостосховища як об'єкту підвищеної небезпеки спонукав до різноманітних досліджень усіх боків його існування, починаючи з моменту експлуатації до теперішнього стану зберігання відходів. Було проведені численні науково-практичні роботи, які мали за мету підвищення технічної та екологічної безпеки, але в зв'язку з ліквідацією виробничого об'єднання «Придніпровський хімічний завод» та створення на його базі державного підприємства «Бар'єр» багато матеріалів, в тому числі й конструкторська та виробнича документація по цьому об'єкту було втрачено.



**Рис. 1. Сучасний стан хвостосховища «Дніпровське» за даними інтернет-порталу Google Earth**

На початку 2000-х років відновилися дослідження стану хвостосховища «Дніпровське», в яких брали участь багато як наукових, так й комерційних організацій. Головною організацією, що курирувала роботи по хвостосховищу, є Український науково-дослідний та проєктно-вишукувальний інститут промислової технології (ДП «УкрНДПВПТ», м. Жовті Води Дніпропетровської обл.). В 2022 році у звіті<sup>1</sup> наведено огляд результатів робіт попередників щодо стану хвостосховища та оточуючої території. Показано, що існує досить велика кількість інформації, котра отримана як зі свердловин, пробурених в межах хвостосховища, на огороджуючих дамбах та на оточуючій території, так й в результаті опробування ґрунтів, повітря та підземних вод, а також моделювання процесів забруднення компонентів довкілля радіонуклідами та іншими речовинами. Але ця інформація розосереджена по різних джерелах з різними ступенем доступності, дещо дублює одне одну та потребує комплексного узагальнення та аналізу.

Дослідженням технічного стану огороджуючих дамб на хвостосховищі «Дніпровське» приділяється підвищена увага у зв'язку з тривалим терміном існування небезпечного об'єкту.

Як показано у звіті,<sup>2</sup> у 2000 році ДП «УкрНДПВПТ» розроблено програму першочергових робіт з ліквідації відкритих радіоактивних виходів на хвостосховищі «Дніпровське», згідно якої планувалося проведення інженерно-геологічних досліджень, інженерно-геофізичних досліджень в складі методів природного поля, вертикального електричного зондування та оцінки сейсмічного впливу вибухів для виявлення ділянок фільтрації рідин з хвостосховища та створення мережі спостережних свердловин. Результати реалізації цієї програми авторам не відомі.

За даними,<sup>3</sup> у 2000 році в рамках проєкту «Невідкладні роботи на захисних спорудах...» було розроблено технічні рішення щодо створення мережі спостережних свердловин на хвостосховищі «Дніпровське». Передбачалося буріння 11 свердловин по гребеню дамби та 70 свердловин в чаші хвостосховища та за його межами. Частково ці заходи реалізовані.

---

<sup>1</sup> Оцінка стійкості огороджуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

<sup>2</sup> Оцінка стійкості огороджуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

<sup>3</sup> Оцінка стійкості огороджуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

У 2001 році, за даними,<sup>4</sup> у Робочому проекті з укріплення дамби на хвостосховищі «Дніпровське» відмічалось, що південно-східна частина дамби за інженерно-геологічною будовою найбільш несприятлива, оскільки тут відмічаються лінзи недоущільнених ґрунтів та розвиваються небезпечні процеси – суфозія, просідання, промоїни. Було запропоновано провести накидку кам'яного матеріалу на відкоси дамби. Ці роботи виконані.

У 2009 р. було облаштовано 10 додаткових спостережних свердловин в тілі захисних дамб<sup>5</sup>, також були встановлені деформаційні марки (поверхневі марки – ПМ) в кількості 30 одиниць для спостереження за вертикальними та горизонтальними зміщеннями в дамбі.

У 2011 р. ДП «УкрНДПВПТ» проведено інструментальний контроль за станом захисних споруд хвостосховища «Дніпровське», про що згадується у звіті<sup>6</sup>. Об'єктами контролю були спостережні гідрогеологічні свердловини та ґрунтові геодезичні знаки (поверхневі марки), встановлені в південній, західній та північно-західній ділянках огорожуючої дамби. В результаті було отримано вихідну інформацію щодо параметрів контрольно-виміральної апаратури, котрі мають використовуватися при подальших спостереженнях.

У 2016 р. ТОВ «УТБ-2» провела інструментальний контроль стану захисних споруд<sup>7</sup>. По результатах встановлено, що дамба знаходиться у стабільному стані, рівень колювання води у спостережних свердловинах незначний, а ділянок обводнення дамби не виявлено. В якості рекомендацій було відмічена необхідність виконати розрахунок стійкості дамби.

Наприкінці 2016 р. ТОВ «ЦРЕМ» під керівництвом професорів Орлінської О.В. і Пікарені Д.С. були виконані дослідження «Проведення інструментального геофізичного та лабораторного обстеження дамби хвостосховища «Дніпровське» та розрахунок стійкості низового укосу дамби в рамках провадження ліцензійної діяльності ДП «Бар'єр»<sup>8</sup>. В результаті застосування геофізичного електророзвідувального методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) на

---

<sup>4</sup> Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

<sup>5</sup> Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське». Звіт. ТОВ «УТБ-2», м. Кам'янське, 2016, 37 с.

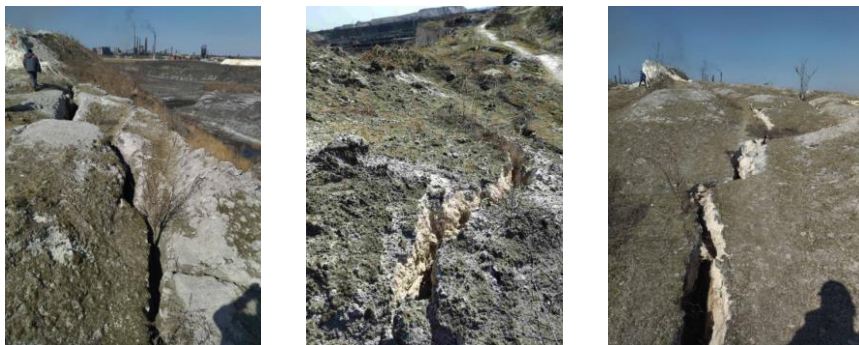
<sup>6</sup> Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

<sup>7</sup> Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське». Звіт. ТОВ «УТБ-2», м. Кам'янське, 2016, 37 с.

<sup>8</sup> Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.

південно-східній дамбі хвостосховища виявлено дві зони з підвищеним рівнем стояння ґрунтових вод довжиною 60 м та 380 м. На південно-західній частині дамби також виявлені дві аналогічних зони довжиною 40 м та 20 м. В цих зонах було проведене інженерно-геологічне буріння 15 свердловин з відбором керну та лабораторним аналізом фізико-механічних властивостей порід. Лабораторні дані використані для оцінки гідрогеомеханічної стійкості низового відкосу огорожуючої дамби хвостосховища «Дніпровське». В результаті розрахунків встановлено, що значення коефіцієнту стійкості південно-східної частини дамби знаходяться в межах 1,78–3,02, що перевищує мінімальну критичну величину 1,2, тобто дамба має значний запас стійкості.

Аналіз робіт по дамбі хвостосховища «Дніпровське» показують, що основна увага приділялася південній частині хвостосховища, а саме південно-східній та південно-західній ділянкам огорожуючої дамби. І це зрозуміло, оскільки саме ці частини несуть небезпеку забруднення природними радіонуклідами річки Коноплянки та заплавних ґрунтів. Північна частина дамби завдяки її похованню під багатометровою товщею металургійних вугільних шлаків та фосфогіпсу вважалася стійкою та безпечною. Але після того, як почали розроблятися вугільні шламонакопичувачі, виникли небезпечні інженерно-геологічні явища – обвали, зсуви та розтріскування потужного шару фосфогіпсу, що становить небезпеку існування захисного покриття радіоактивних відходів. Ці процеси посилилися у 2019–2022 роках та викликали серйозне занепокоєння з боку як експлуатантів хвостосховища, так й контролюючих органів (рис. 2). Саме тому виникла необхідність обстеження повного периметру захисної дамби та оцінки її гідрогеомеханічної стійкості.



**Рис. 2. Прояви небезпечних інженерно-геологічних явищ – обвали, зсуви та розтріскування потужного шару фосфогіпсу на північній дамбі**

## 2. Дослідження технічного стану дамб хвостосховища

У 2022 року проведена оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське» в межах земельного відводу. Згідно з програмою виконувалися геофізичні дослідження із залученням електророзвідувальних методів природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) по гребню огорожуючих дамб за мережею спостереження 3х3 метри та вертикального електричного зондування (ВЕЗ). Результатом застосування цих методів стало виділення у плані ділянок зменшення щільності потоку імпульсів ПЕМПЗ, їх інтерпретація, визначення глибини рівнів ґрунтових вод у дамбі.

Зупинимось коротко на суті вказаних методів.

Метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПЕМПЗ) відноситься до групи електророзвідувальних геофізичних методів. Його застосування рекомендовано нормативними геологорозвідувальними документами, також він залучається при проведенні інженерно-геологічних вишукувань, що знайшло відображення у Державних будівельних нормах ДБН А.2.1-1-2014<sup>9</sup>.

Метод заснований на реєстрації природного імпульсного електромагнітного випромінювання Землі, яке складається з трьох джерел: зовнішнього – сонячна радіація і космічні поля; внутрішнього – обумовлюється геологічними процесами під або безпосередньо на денній поверхні; техногенного – різного роду промислові і побутові випромінювання. Діапазон частот такого інтегрального імпульсного електромагнітного поля від перших герц до мега- і навіть гігагерц. Природне імпульсне електромагнітне поле, що генерується саме внутрішніми джерелами, використовується з метою вивчення геологічних особливостей територій.

Відомо досить багато процесів і явищ, в результаті або протягом яких виникає електромагнітне випромінювання або електромагнітна емісія (застосовуються обидва терміни). Одним з них є п'єзоелектричний ефект мінералів і гірських порід. Іншим досить потужним джерелом служать тектонічні напружки масиву гірських порід, особливо на рівні тисків, що передують утворенню тріщин. Третім значущим джерелом виступають різні електричні і електрохімічні процеси в породних масивах (зміни подвійного електричного шару, електронна емісія при русі розчинів, хімічні перетворення мінералів і порід). В результаті перерахованих процесів утворюється стрибкоподібний сплеск електромагнітного випромінювання, який і називається імпульсом електромагнітного поля. Він характеризується різким збільшенням амплітуди і енергії випромінювання і дуже коротким (мілі- і мікросекунди) часом прояву. Частота проходження імпульсів ПЕМПЗ від перших герц до 20 кілогерц, цим поле ПЕМПЗ відрізняється від атмосферних і техногенних джерел. В поле ПЕМПЗ відсутня будь-яка періодичність,

---

<sup>9</sup> ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. Київ, 2014 р.

характерна для техногенних випромінювачів, що служить для розділення цих джерел.<sup>10</sup>

Експериментальними дослідженнями різних авторів встановлено, що при стисненні кристалічних порід зростає кількість, енергія і амплітуда імпульсів ПЕМПЗ, які перед початком крихких деформацій досягають максимуму. Як тільки настає фаза руйнування (утворення тріщин), кількість імпульсів різко (вертикально) зменшується аж до нуля і потім незначно зростає до деякого рівня, на якому і залишається.

Електромагнітне випромінювання має здатність поширюватися в твердих породах на значну відстань від джерела, при цьому його амплітуда і енергія змінюється досить слабо. Якщо ж на шляху поширення електромагнітного випромінювання зустрічається ділянки замочування порід або зона порожнечі (обводнені і сухі тріщини і т.п.), то інтенсивність випромінювання дуже різко зменшується, а при потужній зоні воно взагалі розсіюється або поглинається. Завдяки цій особливості можна виділяти ділянки, які мають різну щільність потоку електромагнітних імпульсів, тобто кількості імпульсів за одиницю часу.

Ідея застосування методу ПЕМПЗ з метою проведення даного дослідження наступна: імпульсне електромагнітне поле генерується к кристалічних породах Українського щита. Якщо на шляху його розповсюдження зустрічаються обводнені ділянки порід, то його рівень та кількість імпульсів має зменшуватися. Теж саме буде проявлятися у тріщинуватих породах, до яких можна віднести насипні техногенні ґрунти. Розрізнити зони обводнення та техногенні ґрунти можна за допомогою інших методів<sup>11</sup>.

Для досліджень застосовувався прилад «СІМЕІЗ» (мікропроцесорний індикатор електромагнітного поля - МІЕМП 14/4), який призначений для вивчення ПЕМПЗ, а також електромагнітного поля техногенного походження в лабораторних і польових умовах (рис. 3).

Дамба на хвостосховищі була умовно поділена на дві частини північну і південну, які мають різну будову, склад, функції та екологічну значущість. Якщо північна дамба відокремлює площу відводу хвостосховища від техногенних об'єктів інших підприємств, то південна дамба є опорною і захисною від відходів для прилеглих до хвостосховища територій. Це в першу чергу стосується долини р. Коноплянка, куди можуть потрапляти фільтрати зі хвостосховища при неналежному технічному стані південної дамби, тому цій частині дамби було приділено найбільшу увагу під час досліджень. Тут польові роботи проводились тільки у профільно-площинному варіанті. Вздовж дамби закладались 4 профілі з відстанню між

---

<sup>10</sup> Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine / Н. Нapich et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, № 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>

<sup>11</sup> Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine / Н. Нapich et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2023, № 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>

ними 3 м, точки спостережень на них розташовувались теж через 3 м, тобто по квадратній мережі. Така квадратна мережа є оптимальною для виконання будь-яких геофізичних робіт.



а



б

**Рис. 3. Зовнішній вигляд приладу МІЕМП-14/4 (а) та споряджена апаратура (б) у складі власне приладу та виміральної штанги з трьома антенами**

Північна дамба досліджувалась також у профільно-площинному варіанті, як і при дослідженнях на південній частині дамби.

В ході проведення польових робіт на греблі виділялися прямолінійні ділянки так, щоб початок і кінець профілів знаходилися в межах бачення). Це пов'язане з особливостями побудови карт і застосовано для того, щоб уникнути додавання зайвої інформації під час інтерполяції. Координати початку і кінця профілів, свердловин і поверхневих марок (ПМ), що потрапляли у ділянки та які були пробурені і встановлені в інші роки, фіксувалися GPS. Всі ці координати потім співставлялися і коректувалися високоточними геодезичними вимірюваннями

Обробка результатів досліджень здійснювалась шляхом складання для кожної ділянки карт щільності потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ для кожної антени у програмному середовищі Surfer. Для побудови карт використаний метод триангуляції з лінійною інтерполяцією за квадратною вузловою мережею.

В основу інтерпретації карт покладена відмічена вище особливість поля ПЕМПЗ, а саме – зменшення щільності потоку імпульсів магнітної складової електромагнітного поля у ділянках, які розущільнені, тріщинуваті або обводнені. Додатково використовується вигляд рисунку поля ПЕМПЗ. Так, для суцільних, монолітних порід та матеріалів характерне дуже диференційоване поле, з великою кількістю ізоліній та великим розмахом (амплітудою) значень. Для тріщинуватих ділянок рисунок поля більш витриманий, але також диференційований, хоча у меншому ступеню. Обводнені ж ділянки мають спокійний, «розмитий» рисунок поля, з невеликою кількістю ізоліній, значення яких знаходяться на низьких рівнях.

Для кожної ділянки досліджень та для даних, отриманих з кожної антени побудовані карти щільності потоку імпульсів магнітної складової природного імпульсного електромагнітного поля Землі, приклад таких карт наданий на рис. 4. За методикою та принципами інтерпретації зйомки ПЕМПЗ, наведеними вище, виділені зони названі аномальними, в яких діагностується розуцільнення та обводнення матеріалів, з яких складена дамба. Усього виділено 33 зони, їх розташування показано на рис. 5.

Після виділення аномальних зон метод ПЕМПЗ у найбільш характерних точках проведені дослідження ВЕЗ.

Метод вертикального електричного зондування (ВЕЗ) є одним з найбільш поширених електророзвідувальних методів. Однією з основних вимог до його застосування є контрастність за фізичними властивостями об'єкту вивчення відносно вміщуючого середовища, тобто, об'єкт (тіло, шар, пласт та ін.), що вивчається, повинен помітно (бажано у декілька разів) відрізнятися по питомому електричному опору від вміщуючих порід.

ВЕЗ прийнято використовувати для вивчення горизонтально-шаруватих середовищ з невеликими кутами нахилу меж (до 15–20 градусів).

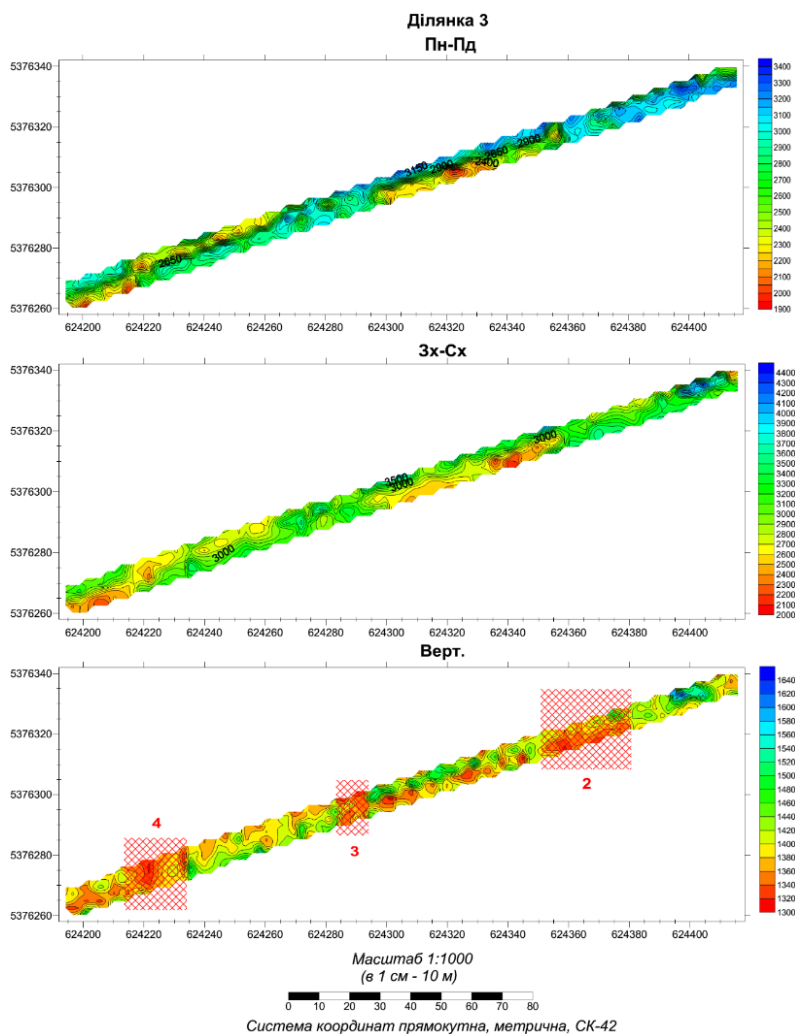
Методика досліджень. На поверхні землі збирається симетрична електророзвідувальна установка типу Шлюмберже, яка складається з двох живлячих електродів і двох приймальних (рис. 6). В якості електродів застосовуються металеві штирі, які забиваються у ґрунт на глибину до 20 см. Половинна відстань між живлячими електродами А і В (рознос АВ/2) складає 3 м, 4,5 м, 6 м, 9 м, 15 м, між приймальними електродами М і N (рознос MN) – 1 м.

До живлячих електродів підключається джерело струму – генератор постійного струму. У землі виникало електричне поле і, відповідно, електричний струм. Сила струму в живлячій лінії ( $I_{AB}$ ) вимірювалася за допомогою амперметра, включеного в електричне коло АВ.

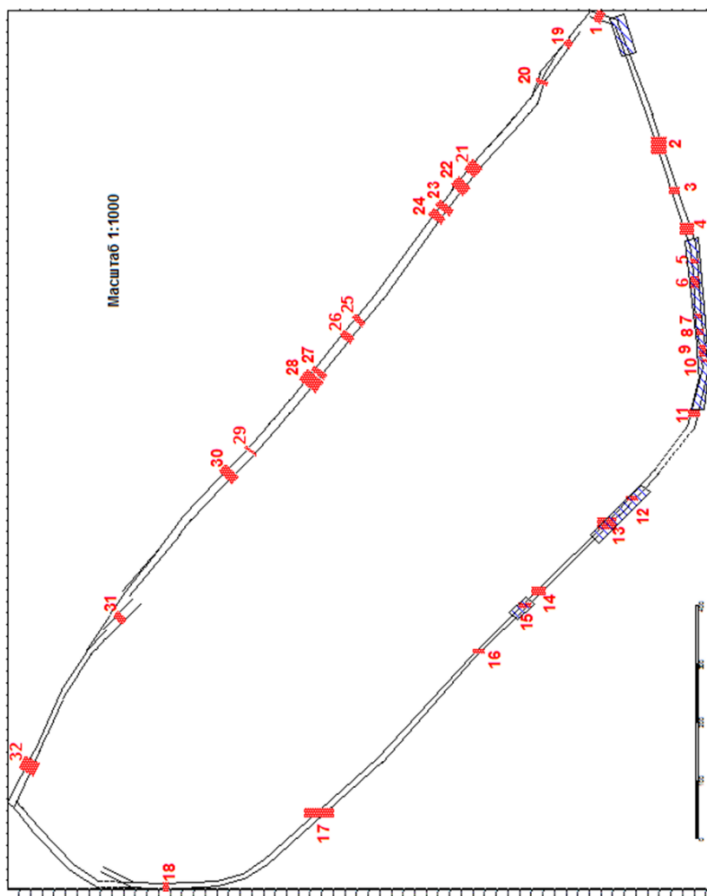
Кольорові шкали характеризують щільність потоку імпульсів магнітної складової ПЕМПЗ, імпл./0,5 с.

Червона клітинка – ділянка розуцільнення ґрунтів дамби, обводнення та фільтрації розчинів, її номер.





**Рис. 4. Приклад карти щільності потоку імпульсів магнітної складової природного імпульсного електромагнітного поля Землі на дамбі хвостосховища «Дніпровське» за антенами, орієнтованими у меридіональному (Пн-Пд), широтному (Зх-Сх) та вертикальному (Верт.) напрямках**



**Рис. 5. Порівняльна схема розташування ділянок обводнення та фільтрації у греблі за результатами робіт 2022 року (червоне) та 2016 року (синє)**



**Рис. 6. Схематичне зображення симетричної електророзвідувальної установки типу Шлюмберже: А, В – живлячі електроди, М, N – приймаючі електроди**

На приймальних електродах М і N виникала різниця електричних потенціалів ( $\Delta U_{MN}$ ), яка вимірювалася за допомогою вольтметру.

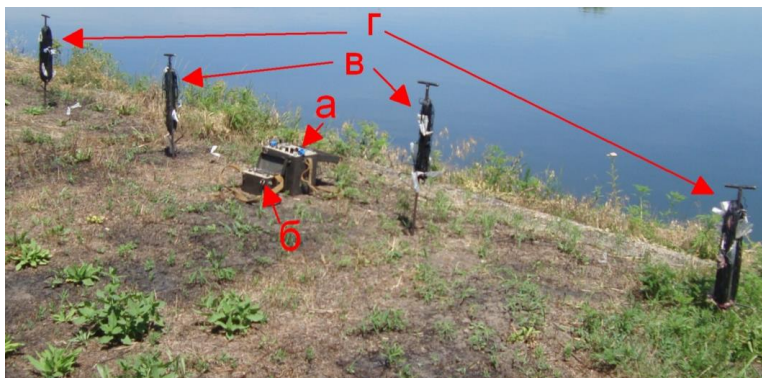
За результатами вимірів можна судити про електричні властивості гірських порід на глибинах проникнення струму в землю. Глибина «занурення струму» залежить, в основному, від відстані між живлячими електродами А і В.

Для виконання зондування здійснюють серію вимірів, поступово збільшуючи розмір живлячої лінії АВ. Чим більше параметр  $AB/2$  - тим глибше «занурюється струм в землю» і тим більше глибинність дослідження. При цьому кожна наступна область дослідження повністю включає попередню.

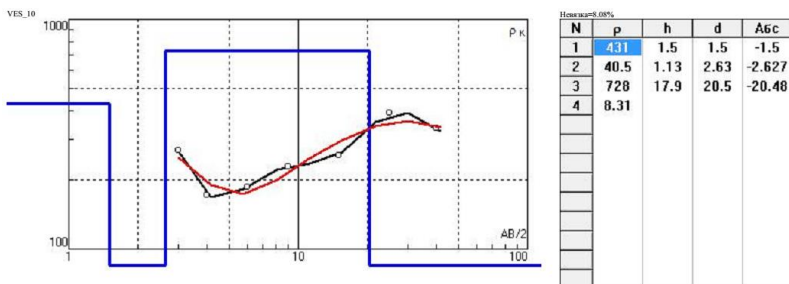
В результаті описаної серії вимірів виходить набір значень уявного опору, виміряних при відомих  $AB/2$ .

При дослідженнях використовувалася апаратура електро-розвідувальна шахтна (ШЕРС-5М), яка призначена для проведення в наземних умовах і гірничих виробках геофізичних робіт методами електророзвідки (рис. 7).

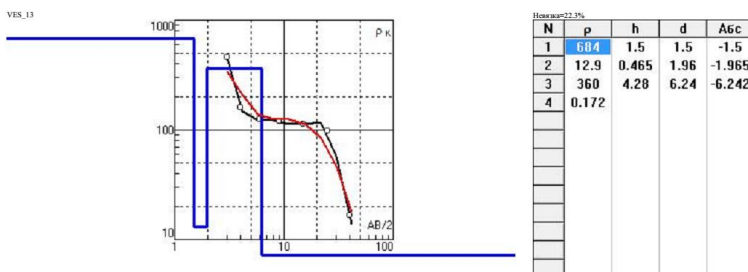
Обробка та інтерпретація результатів вимірювання питомого електричного опору порід проводилася за допомогою програми IPI2Win. Ця програма розроблена для автоматичної і напівавтоматичної (інтерактивної) інтерпретації даних різних модифікацій вертикальних електричних зондувань, в тому числі традиційними установками та призначена для використання на персональних комп'ютерах. Результати інтерпретації за програмою IPI2Win (приклади) наведені на рис. 8.



**Рис. 7. Електророзвідувальна апаратура ШЕРС-5М у спорядженому стані: а – генератор струму; б – вимірювач; в-г – електроди: в – вимірювальні, г – живлячі**



Точка 10: Розріз представлений чотирьохшаровою кривою.  
 1 шар (0 – 1,5 м) – сухі суглинки, потужність 1,5 м; 2 шар (1,5 – 2,63 м) – зволожені суглинки, потужність 1,13 м; 3 шар (2,63 – 20,48) – сухі суглинки, потужність 17,9 м; 4 шар з 20,48м) – сильно обводнені суглинки



Точка 13: Розріз представлений чотирьохшаровою кривою.  
 1 шар (0 – 1,5 м) – сухі суглинки, потужність 1,5 м; 2 шар (1,5 – 1,965 м) – обводнені суглинки, потужність 0,465м; 3 шар (3,403 – 6,242) – сухі суглинки, потужність 4,20 м; 4 шар ( з 6,242м) – сильно обводнені суглинки

**Рис. 8. Приклади інтерпретації кривих уявного електричного опору в обводнених ділянках дамбу хвостосховища за даними вертикального електричного зондування**

Параметри моделі для поточної точки ВЕЗ (номер шару від поверхні (N), питомий електричний опір ( $\rho$ ), потужність кожного шару в метрах (h), глибина залягання підосви шару від поверхні (d)) представлені в вікні кривою синьою лінією – псевдокаротажною кривою (рис. 8). Крім того, вони також представлені у вигляді таблиці в окремому вікні (вікно моделі), в заголовку якого винесено значення нев'язки теоретичної і польової кривої. Теоретична крива ВЕЗ для поточних параметрів моделі зображена у вікні кривих червоною лінією.

Під нев'язкою по опору розуміється відносне відхилення теоретичної кривої від польової кривої для поточної точки зондування і поточних параметрів моделі. Ці відхилення обумовлені перешкодами, які впливають на точність польових вимірювань. Найбільш значущі з них: апаратурні перешкоди: шуми вимірювача, погрішності роботи генератора та ін.; методичні погрішності: відхилення положень електродів від прямої лінії, індукційні наведення і ін.; наведення від ліній електропередач, електрифікованих залізниць і так далі; вплив рельєфу; наявність пухких насипних (техногенних) ґрунтів; наявність підземних комунікацій, трубопроводів. Вплив перешкод призводить до різних спотворень на кривих ВЕЗ.

### **3. Комплексна інтерпретація виділених зон**

Розподіл кількості аномальних зон по дамбі хвостосховища «Дніпровське» має певні закономірності. Так, виділяються дві ділянки концентрації аномалій – на південній частині греблі, що примикає до р. Коноплянка, та на північно-східній ділянці, яка примикає до відстійників металургійного та коксового виробництва. Декілька невеликих аномальних зон виділяються на південно-західній ділянці греблі. Найбільше занепокоєння викликає зона концентрації аномалій на перегині греблі на південній ділянці. Ця зона виділялася нами раніше при проведенні робіт з оцінці технічного стану греблі у 2016 році. Тоді також залучалися геофізичні методи ПЕМПЗ та вимірювання ПЕД гамма-випромінювання. На рис. 5 показане співставлення положення раніше виділених та сучасних аномальних зон. Добре помітно, що майже усі вони співпадають, але є деякі відмінності, пов'язані, насамперед, з різною мережею спостережень (у 2016 році вона становила 5\*5 метрів). Таке співпадіння дозволяє стверджувати, що зони виділені впевнено та є об'єктивними. Це виключає можливість помилкового виділення та свідчить про наявність проблем з обводненням тіла греблі, яке за період 6 років тільки посилилося.

Світовий досвід експлуатації великих гребель на річках та огороджуючих гребель на хвостосховищах показує, що саме ділянки вигину греблі в бік, протилежний хвостосховищу, як й ділянки зчленування гребель, є найбільш небезпечними з точки зору розвитку аварійних ситуацій (наприклад, хвостосховища Айка, Брумадіньо, Бая-Маре, Карамкен тощо). Немає ніяких підстав вважати, що подібна ситуація неможлива й тут.

На північній ділянці греблі також встановлені зони обводнення, але їх походження, вочевидь, інше. Північна гребля похована під багатометровою товщею відходів металургійного виробництва та межує з відстійниками, які мають глибину до відмітки 52-50 м. Оскільки

відстійники, на відміну від хвостосховища, є активними та експлуатуються, існує гідродінамічний перетік розчинів як з відстійників до хвостосховища через греблю, так й назад, з хвостосховища до відстійників. Радіоактивного забруднення у відстійниках поки що не зафіксовано, але гребля у нижній частині інтенсивно обводнена. Це не впливає на її геомеханічну стійкість, оскільки прориватися нема куди – з усіх боків вона затиснута радіоактивними відходами, металургійними шламами та зверху – відходами коксохімічного виробництва та фосфогіпсом. На південно-західній ділянці також виділяються декілька зон розуцільнення, але казати про фільтрацію розчинів з боку хвостосховища немає підстав.

За результатами геофізичних робіт виділені ділянки, на яких поставлено інженерно-геологічне буріння. В межах площі вишукувань виділено водоносний горизонт, що належить до четвертинних алювіальних відкладів заплави та кори звітрявання кристалічних порід, яка їх підстилає. Характеризується водоносний комплекс приуроченістю до надзаплавних терас четвертинного віку р. Дніпро та його притоків, водовміщуючі породи представлені різнозернистими пісками з прошарками суглинків, супісків, глин, та уламково-тріщинувата зона архейських гранітоїдів що їх підстилає. Безпосередньо на ділянці огорожувальної дамби у період проведення вишукувань підземні води зустрінуті у південній частині дамби на глибинах 4,0-6,2 м, на південно-західній ділянці дамби- на глибинах 9,0-10,2 м від поверхні. Окрім основного водоносного горизонту вище по розрізу було розкрито локальні малопотужні горизонти «верховодки», що чітко фіксуються при бурінні та підтверджуються даними фізичних властивостей ґрунтів, які були відібрані з цих глибин. Таким чином результати бурових робіт повністю підтверджують виділені за геофізичними даними зони обводнення і розуцільнення.

## **ВИСНОВКИ**

Моніторингові дослідження, проведені у 2016 та 2022 рр. показали суттєве погіршення, особливо, в південно-східній частині, технічного стану огорожувальної дамби Дніпровського хвостосховища, а тому пропонується наступне:

1. В 2025-2026 рр. провести повний комплекс досліджень, який включає геофізичні методи ( ПЕМПЗ, ВЕЗ, радіометрія), буріння свердловин з відбором проб та їх лабораторним аналізом.

2. На виділеній небезпечній ділянці дамби в південно-східній частині один раз на рік, чи один раз у два роки, робити скорочений комплекс геофізичних досліджень, невеликий об'єм бурових робіт та лабораторний аналіз відібраних проб ґрунтів.

3. В південно-східній частині дамби, де визначені ділянки фільтрації, встановити геодезичні марки для спостережень за зсувними деформаціями на дамбі.

4. Чотири рази на рік відслідковувати рівень ґрунтових вод в спостережних свердловинах, а також відбирати воду на аналіз щодо наявності в ній радіонуклідів.

5. У підніжжя північної частини дамби на стику з відстійниками ДМЗ один раз на рік проводити контроль радіаційного фону для встановлення можливих зон фільтрації забруднених розчинів.

6. З метою визначення шляхів міграції забруднених розчинів 4 рази на рік відбирати проби ґрунтів на схилах дамби, а також зразки рослин для аналізу наявності в них радіонуклідів.

7. Чотири рази на рік досліджувати стан води та донних відкладень у р. Коноплянка, приділивши підвищену увагу пробам перед дамбою на річці.

Для поліпшення технічного стану хвостосховища «Дніпровське» пропонується розробити проектну документацію та реалізувати заходи, які забезпечать:

- організоване відведення поверхневих вод з поверхні хвостосховища;
- реорганізацію рельєфу поверхні хвостосховища;
- укріплення низового укосу дамби хвостосховища;
- зниження фільтрації через дамбу хвостосховища.

## **АНОТАЦІЯ**

В результаті застосування комплексу геофізичних методів на огорожжуваних дамбах хвостосховища «Дніпровське» у складі методу природного імпульсного електромагнітного поля Землі та вертикального електричного зондування встановлені ділянки підвищеного зволоження ґрунтів, які складають тіло дамби, визначено їх просторове положення та глибини від поверхні. Показано, що положення цих ділянок протягом шості років не змінилося, що свідчить про надійну їх фіксацію за допомогою комплексу застосованих методів. Контрольне буріння показало наявність зволжених ґрунтів у цих зонах. В якості рекомендацій щодо недопущення подальшого розвитку небезпечних інженерно-геологічних процесів у тілі дамби запропонована низка заходів щодо моніторингу за технічним станом та розробки проекту відновлення технічного стану до нормативних показників.

## Література

1. Оцінка стійкості огорожуючих дамб хвостосховища «Дніпровське»: Загальна пояснювальна записка. Книга 1. Текст / Д. Пікареня та ін. Кривий Ріг : ТОВ «ВАЙТПРОДЖЕКТ», 2022. 154 с.
2. Інструментальний контроль стану захисних споруд хвостосховища «Дніпровське». Звіт. ТОВ «УТБ-2». Кам'янське, 2016. 37 с.
3. ДБН А.2.1-1-2014. Інженерні вишукування для будівництва. Київ, 2014. 126 с.
4. Prospective methods for determining water losses from irrigation systems to ensure food and water security of Ukraine / H. Napich et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2023, № 2. P. 154–160. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/154>

### **Information about the authors:**

**Pikarenia Dmytro Serhiiovych,**

Doctor of Geological Sciences

Professor at the Department of Labor Safety and Environmental Protection

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Orlinska Olha Viktorivna,**

Doctor of Geological Sciences,

Professor at the Department of Mining

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Rudakov Leonid Mykolaiovych,**

Candidate of Agricultural Sciences,

Dean of the Faculty of Water Engineering and Ecology

Dnipro State Agrarian and Economic University

25, Serhii Efremov str., Dnipro, 49000, Ukraine



# 05

## CHAPTER

### **Modern tools in business performance management**

## **TEAM FORMATION FEATURES AT IMPLEMENTATION OF OPERATIONAL EFFICIENCY INCREASE PROGRAMS AND PROJECTS**

**Rovenska V. V., Smyrnova I. I., Latysheva O. V.**

### **INTRODUCTION**

The subject of the research is a critical aspect of contemporary project management. In recent years, the drive for operational efficiency has become paramount in various industries and organizations. Achieving and sustaining efficiency requires not only the right strategies and methodologies but also a well-organized team. As organizations try to optimize their processes and resources, understanding the dynamics of team composition emerges as a pivotal factor in the success of such efforts.

This research delves into the intricate interplay between team structure, composition, and the overarching goals of operational efficiency projects, providing invaluable insights for project managers, researchers, and practitioners alike.

### **1. The problem's prerequisites emergence and the problem's formulation**

It is necessary to have long-view and develop a strategy for the restoration and development of industrial production for successful post-war revival of Ukraine: the driver of the national economy, considering the existing and potential risks and challenges of the war (post-war) sit, and also determine the existing opportunities for optimal use of resources, develop projects for increasing operational efficiency in the context of the «Performance management» concept.

### **2. The analysis of existing methods for solving the problem and formulating a task for the optimal technique development**

«Performance management» technologies are a set of instruments for increasing the productivity of employees and the operational efficiency of the business.

Using of «performance management» instruments provides the opportunity to achieve high labor productivity for business through the next factors:

- it helps to establish clear goals, tasks, job requirements and key performance indicators (KPI) for employees and teams;

- it allows to assess the personal and collective performance and productivity of employees and, based on the results, to identify problem areas, in particular, in the qualifications and skills of staff;
- it helps to determine priorities for further development of competencies and improvement of professional and flexible skills;
- it allows to define clear criterias for providing rewards to employees;it provides future support for high motivation and achievement of the company's strategic goals, etc.

That's why the main task of programs and projects of improving operational efficiency on the basis of «performance management» technology consists of providing the work of the project team for achieving the strategic goals of the organization and to provide the optimal use of resources and increase the productivity of an individual employee, team members and the team as a whole, work group.

There are certain differences between a team, a group, and a working group (Table 1).

Nowadays there are many types of team, depending on the key feature, the following types of teams can be defined (Table 2).

It should be understand that the presented classification (Table 2) cannot cover all existing types of teams because it is difficult to take into account all the features of team formation and the specifics of different companies.

Therefore, it will not be complete, like any classification of a certain process or phenomenon in advance, because it is almost always possible to highlight a certain feature and then form its own classification (in this case, a list of command types). For example, there are such types of teams outside the presented list of teams (Table 2): autonomous teams, semi-autonomous teams, self-managed teams; production, management, service teams, resource provision teams; teams working within one project or portfolio of projects (project teams) and others.

Table 1

**The sense of the concepts «team», «group» and «work group»,  
the main features and differences between them<sup>1</sup>**

<b>The sense of the concept</b>	<b>The main features</b>	<b>The main difference</b>
A team is a small group of people with different training, which are involved from different fields, work together to solve specific problems	The team has a single goal with clearly established goals and tasks, the activities of team members are coordinated for achieving these goals. The team is	The main difference between a team and a group is that a team has a common goal and works together for its achieving, whereas a

<sup>1</sup> Source: grouped by authors based on the systematization of sources [1–12]

to achieve common goals. A team is made up of members who have different skills and experiences but work together to achieve shared success.	characterized by a high level of cooperation, mutual support and trust. Team members are able to communicate effectively, make decisions and solve problems together; they have complementary knowledge and skills	group consists of people who simply work in the same place or belong to the same organizational unit. The main difference between a work group and a team is that the members of a work group usually work independently of each other, while the members of a team work together to achieve common goals. The working group has a bright and strong leader; leadership is distributed among its members in the team, the team practices the so-called leadership shift: when performing certain tasks, different members of the team act as leaders (in contrast to a work group, the leader of which can delegate authority to subordinates but at the same time remains the sole leader). There is only one personal responsibility in the working group; the team has both personal and mutual collective responsibility for achieving the overall result
A group is a group of people who work in the same place or belong to the same organizational department. The group (traditional work group) is a set of work groups with their own traditions, rules, job instructions and established composition.	Group members may have different goals and responsibilities and do not necessarily work together to achieve common goals. The group can include several teams or none. As a rule, group members are connected by the general framework of the organization, by interest groups and personal relationships but they may not have a common goal and common values since everyone works on his/her own task and belongs to his/her «communication group» within the organization and his/her intra-group «subculture».	
A work group is a group of people who work together but each of them performs their work independently.	The members of the work group do not have a common goal and do not depend on each other for success, they can share information and experience but each of them is responsible for his part of the work.	

Table 2

**Classification of teams<sup>2</sup>.**

<b>Sign</b>	<b>Type of team</b>	<b>Comment</b>
1. By status	1.1. Official teams 1.2. Unofficial teams	1.1. Official teams are legally formal entities operating within the framework of the legal space, such as the stuff of an enterprise or its department; 1.2. Unofficial ones are based on the unrecorded (and in some cases, undeclared) desire of people to cooperate with each other and the actual practice of such cooperation.
2. By the nature of internal connections	2.1. Formal teams 2.2. Informal teams	Officially created teams provide for the presence of both types of connections (formal ones carry the main load, and informal ones complement them). The communication is extremely informal in unofficial teams. Formal ties represent relations between positions, they are characterized by hierarchy, informal ties exist between individuals, regardless of what place they occupy at official service levels.
3. By the mechanism formation	3.1. Spontaneously formed teams. 3.2. Consciously organized teams.	3.1. Spontaneously formed teams (for example, a student team); 3.2. Consciously organized teams (for example, teaching staff). At the same time, spontaneously formed teams can be further structured deliberately (for example, it depends on the foreign language studied by students, study groups are completed), and deliberately selected ones can be randomly (for example, alphabetically).
4. By the existence time:	4.1. Temporary teams 4.2. Permanent commands.	In practice, the temporary nature of the team is usually associated with the fact that it is intended to solve a certain one-time task.

---

<sup>2</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [4; 10–12])

Continuation of the table. 2

<b>Sign</b>	<b>Type of command</b>	<b>Comment</b>
5. By functions:	5.1. Teams that are focused on achieving a certain goal 5.2 Teams that are focused on realizing a common interest 5.3. Teams that are focused on communication	5.1. Teams that are focused on achieving a certain goal (both official and unofficial ones are such as political party, company stuff); 5.2 Teams that are focused on the implementation of a common interest (a society of philatelists, dog breeders, water rescue, etc.); 5.3. Teams that are focused on communication (interest clubs).  In turn, functional classification can be supplemented and detailed by classification by types of activity.
6. By size:	6.1. Small; 6.2. Big ones	There is no single criterion for the number of participants
7. Depending on the tasks, resources of the team and individual tendencies of its members, the following types of teams are distinguished	7.1 Problem Solving Teams 7.2 Creative (research) teams 7.3. Tactical implementation teams	7.1. Problem-solving teams are targeted on complex and ill-defined problems. Members of these teams must enjoy well-deserved trust, be reliable, intellectual and pragmatic people. 7.2. Creative (research) teams are targeted on researching the possibilities of the environment and searching for alternatives. Employees of such teams must have stable self-motivation, be independent, creative and persistent in the implementation of collective goals. 7.3. Tactical implementation teams are targeted on the implementation of the given plan. They need a clear statement of the task, a clear department of roles and the formulation of clear success criteria.

Continuation of the table. 2

<b>Sign</b>	<b>Type of command</b>	<b>Comment</b>
8. Teams in various fields of activity	8.1. Business team; 8.2. «Office of the President» or the executive team of the corporation; 8.3. Multifunctional team; 8.4. Special team as a kind of self-managed team; 8.5. Search and rescue team; 8.6. Team performing «rough work»; 8.7. SWAT – team (skilled with advanced tools); 8.8. Sports team; 8.9. «Theatrical» team; 8.10. Transnational team.	1. Business team is a group of business, competent employees who have a certain degree of freedom in making and implementing decisions; such group is aimed at finding innovative solutions, receiving benefits from projects; 2. «Office of the President» is a team of heads of the corporation that performs the functions of coordination and collective decision-making in matters of domestic and foreign policy; 3. Multifunctional team is formed with the aim of improving the coordination of the functioning of key specialists in specialized areas of development, improving expertise, streamlining the use of resources and optimizing possible changes; 4. Special team is a type of self-managed team that works autonomously on the implementation of a certain part of the task and independently makes decisions within its competence; 5. Search and rescue team is a group of specialists with special knowledge and skills which is aimed at solving specific problems related to emergency situations; 6. Team performing «draft work» is a group of talented and creative individuals isolated from top management which are aimed at solving specific and complex tasks independently. <sup>3</sup> 7. SWAT – team is a type of team for solving problems in a certain area, that is competent and has a set of effective and modern tools; 8. Sports team is a group of specialists where the «coach» ensures the fullest realization of the individual talent of each «star» and monitors the performance of assigned roles; 9. «Theatrical» team is where the manager defines the goal of team activity and the role of each team member who perceives his contribution to team activity as unique; 10. Transnational team is a cohesive group that consists of members which belongs to different national, religious and social groups; get development when the organization is integrated into the global development process.

<sup>3</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [10–12]

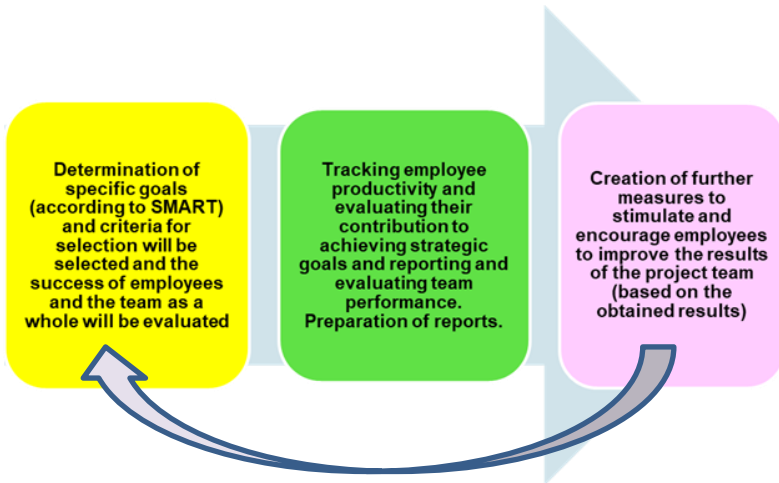
<b>Sign</b>	<b>Type of command</b>	<b>Comment</b>
9. According to the characteristics of the composition of the team and the direction of its activity	9.1. Functional team. 9.2. Multidisciplinary team. 9.3. Self-managed team.	Functional team: works effectively in a traditional hierarchical organization and a market that is weakly developing and predictable; is created from specialists to effectively solve tasks on the basis of a clear system of organizational management and submission; can offer innovative solutions but the right to make decisions and set goals remains with the management. Multidisciplinary team: the most effective in an organization that is focused on team activities, that functions in the conditions of a changing and poorly predictable market; unites specialists from a number of organizational divisions or partner organizations whose competence allows finding and implementing the most optimal solution to a complex and difficult problem; the combination of abilities of team members that complement each other creates a synergistic effect that determines the high potential of a multidisciplinary team. Self-managed team: the most effective in terms of starting a new business when creating a new organization and structure; is characterized by a high level of freedom in making and implementing decisions, can implement projects from an idea to its full implementation; consists of specialists with a high level of professionalism in a number of areas that mutually complement each other.

---

<sup>4</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [4; 10–12]



However, the key to successful team building for any type of teams is an understanding how «Performance management» technologies can be used for obtaining the planned result of increasing labor productivity and, achieving the company's strategic goals, etc. According to the ideology of the «performance management» concept, this process of team building, in our opinion, may include the following tasks (Fig. 1):



**Fig. 1. The main tasks stages of team building<sup>5</sup>**

1. Determination of specific goals and criteria (see Fig. 1), according to this, the team will be selected and the performance of employees (team members) will be evaluated.

First, clear and specific SMART goals are set, which the project team must achieve. These goals should be aimed at achieving the company's strategic goals, which helps employees have a clear idea they should strive for. A key important aspect is that the goals must be measurable in order to assess the success of employees in achieving them. For example, goals might include increasing productivity by 10% over the course of a year or reaching a certain level of sales.

2. Monitoring and evaluation of the results of the team's work (see Fig. 1) assumes that at the second stage – data is collected and the results of the team's work are evaluated. This may include performance evaluation, quality of work performed, use of resources, and other factors that affect the achievement of goals. Various metrics and key performance indicators are used to evaluate the performance of project team members and the team as a whole. These can

---

<sup>5</sup> Source: created by the authors based on the systematization of sources [1–12]

be, for example, the time of completing tasks, the quality of the work performed, the consumption of resources, etc. Periodic evaluations of employees can take the form of regular performance conversations, during the process the employee and the manager share impressions of the work and determine how the results can be improved. Formal evaluations can also be conducted based on collected data and performance indicators. Analytics and reporting are essential for evaluating employee performance and their contribution to the organization's strategic goals. Data collection and analysis help managers make informed decisions about development and productivity. For example, a manager can identify which specific areas need improvement and develop an action plan based on this information by analyzing data. Assessment and tracking results are carefully analyzed to identify project team strengths and weaknesses, identify problem situations, and identify opportunities for performance improvement.

3. The last stage (see Fig. 1) is the development of further measures to stimulate and encourage employees to improve the results of the project team. On the basis of the obtained results at this stage, measures are developed to improve the results of the project team's work, recommendations are provided to team members to improve their productivity. It can be trainings for improving the qualifications of employees, mentoring, coaching and other forms of support and cooperation, as well as the introduction of new systems of stimulation and encouragement of employees for achieving set goals and high results (achievement bonuses, verbal recognition and other forms of reward). Through the implementation of these measures, awareness of team members is ensured through the creation of clear rules and procedures, competencies and skills are improved, mutual support and mutual trust among team members increases.

Proposed setting of tasks (see Fig. 1) allows to understand how to improve the performance of the team as a whole, as it contributes to the clear definition of common goals, performance criteria of each team member and the effectiveness of the team's work.

In this context, we think that an effective team can be understood as a group of people who:

- consists of members who have different skills and experience but work together to achieve group success and common goals;
- characterized by a high level of cooperation, mutual support and trust;
- be able to communicate effectively, make decisions and solve problems together;
- accepts mutual responsibility for results and strives for continuous development and improvement;

That's why it can be assumed that such an effective team is formed due to the interrelationship of various favorable factors, which can be combined in

terms of content and which in turn contribute to the creation of an effective team (Table 3).

On the contrary, there are barriers such as factors that prevent the creation of a successful (efficient, highly productive) team, which is caused primarily by: inability and/or unwillingness to work in a team (due to incompetence, undeveloped soft skills and egocentrism of individual workers); incorrect distribution of responsibility; shortcomings in the evaluation of work results, for example:

1. All employees have an individual work plan which is provided by the manager. Moreover, competition with other employees is possible during the implementation of this plan.

2. One of the employees is responsible for the failure to achieve the planned results, for example, the head of the department or only the employee whose individual plan is executed worse than others.

3. Each employee is responsible only for his part of the work under conditions of independence of cooperation. For example, the sales department has a certain number of orders and the supply department does not have time to fulfill the received orders because of overload line. As a result, the dissatisfied customer turns to other, more responsible suppliers.

4. The best employees are rewarded at the end of the reporting period or project. There are different options: only some employees can be rewarded or no one gets a bonus and there is also a possibility of a «reverse penalty» where some employees will be penalized.

Based on the definition of the concepts «team», «group» and «work group», the main features and differences between these concepts (Table 1), the typology of teams (Table 2), the formulation of the essence of an effective team, established favorable factors for the creation of an effective team (Table 3) and existing barriers to the creation of an effective team, it is worth stating that the team building procedure in programs and projects to increase operational efficiency based on the principles of «performance management» technology involves diagnosis, attestation (evaluation) of stuff and their subsequent selection in project teams.

In this case, team building can take place in three directions<sup>6</sup>: 1. Formation of highly effective teams based on the data of certification or stuff evaluation. 2. Selection of appropriate stuff and completing of appropriate teams according to the information received during organizational diagnostics, attestation or assessment of stuff, taking into account abilities, skills, abilities to work in a team. 3. Reshaping of existing teams based on the data of organizational diagnostics, attestation and evaluation of stuff in order to achieve maximum efficiency.

---

<sup>6</sup>Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [4; 12, p. 76–88]

Table 3

**The main factors that contribute to the creation of an effective team<sup>7</sup>**

Groups of factors	Comment
<p>Positive interdependence and a high degree of action, compatibility, harmony and trust between team members.</p> <p>High level of participation and satisfaction with team membership:</p>	<p>These factors predict the successful perception of interpersonal communication in the team. Each team member must believe in a strong partnership and contribute to overall success. It is also important to support each other and pool resources. A high degree of harmony and trust among team members means that team members must trust each other and have a common focus on achieving team goals. Team members must be sure of the possibility of prompt correction of interaction (if necessary). However, it is more important that they develop arrangements and master working together in accordance with these arrangements, rather than always overcoming the difficulties associated with the need to coordinate themselves and others.</p> <p>An effective team has personal compatibility, which includes physiological, psychological and social compatibility.</p> <p>Team members should be actively involved in teamwork processes and feel satisfied with their membership.</p>
<p>Individual responsibility and at the same time clear self-identification of individuals with the team</p>	<p>This factor implies an increase in the conviction of team members regarding their personal contribution to group work. Each team member should feel that his efforts are recognized and it motivates him/her to be more responsible for the overall success. Constant information about the necessity for help and support to complete the task is also important. Clear self-identification of individuals with the team implies that the team must have members who identify with the team and prioritize collective interests over individual ones.</p>
<p>A small number of team members</p>	<p>The optimal team size is 10-12 people. A large team may be less effective at solving tasks and coordinating.</p>

<sup>7</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [1–12]

Groups of factors	Comment
<p>Shared awareness of the team's mission and goals, awareness of one's role in the team.</p> <p>Formation and support of group procedures</p>	<p>Team members must have the same idea what the team should achieve and which goals should be fulfilled according to the defined priority. Forming and maintaining group procedures involves having the necessary procedures for discussing issues such as achieving group goals, maintaining working relationships and exchanging ideas.</p> <p>The team has clearly defined roles and functions, as well as team procedures and rituals, conflict resolution methods, decision-making methods, feedback methods, usually the leader does not seek to dominate other team members.</p>
<p>Established effective interpersonal communication</p>	<p>This factor involves the development of group norms, the exchange of multifaceted information, the building of trust and mutual understanding in the team. It contributes to the creation of a favorable environment for cooperation.</p>
<p>Cooperation skills (interchangeability). Complementary abilities and interdependence of team members</p>	<p>This factor implies the presence of professional and social skills necessary for joint work on mutually beneficial goals and tasks. The team must have the ability to work effectively together. Team members must have different skills and talents that complement each other and understand that their success depends on teamwork and support. It is very useful when there is interchangeability in the team, which consists of the distribution of responsibility, information and authority. Each member of the team must have access to information about the goal and progress of the joint activity and at any time can assume a leadership role in the entire team.</p>
<p>Professional competence and high motivation of team members:</p>	<p>Each member of the team must have the necessary knowledge and skills to perform their duties, and also be motivated to achieve the team's goals. The team is motivated and receives a team reward</p>

The traditional approach to team formation which has been widely used in practice, is the selection of the main four stages of team formation<sup>9</sup>: Stage 1.

<sup>8</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [1–12]

<sup>9</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [12, p. 76–88]

Starting team (Fig. 2). Stage 2. Transition period team (Fig. 3). Stage 3. Experienced team (Fig. 4). Stage 4. Mature team (Fig. 5).



**Fig. 2. Starting team model <sup>10</sup>**

Cross-functional teams are created, they include formal controllers – on the slide – a red-coloured human figure, controllers are called team leaders, they are not elected, but appointed by management (Fig. 2). Here, the light green are team members to whom authority is first delegated. The controller is the leader who is present in the day-to-day operations of the team but its members are expected to take some responsibility for the success or failure of the firm. Duties previously performed by the manager-controller are delegated first to some and then to all team members. Team members are required to solve their own problems. The controller (leader) of the team acts as a mentor who teaches the team members how to act in certain situations but the team members no longer have to turn to him for every problem.

John Katzenbach and Douglas Smith reveal some leadership expectations during the team development stage. External controllers and team leaders are expected to help teams develop shared goals, objectives and approaches, stimulate focus and confidence, reinforce the different skills and abilities of team members, manage the team's relationships with the environment and remove obstacles, create opportunities for team members to improve, and perform real work together with other team members. John Katzenbach and

---

<sup>10</sup> Source: proposed and created by the authors and grouped by the authors based on the systematization of sources [1; 12, p. 76–88]

Douglas Smith <sup>11</sup>outline some basic leadership expectations at this stage of team development. External controllers and team leaders are expected to fulfill the following obligations:

1. Providing assistance to teams in the formation of common goals, tasks, and approaches. Team leaders are expected to work alongside other team members, but at a distance from them and to see the perspective. At this stage, team leaders maintain a precarious balance between managing team members and advising them.

2. Stimulation of purposefulness and confidence. One of the main tasks of the team leader at this stage is to encourage the confidence and purposefulness of its members and the team as a whole by means of a positive assessment of the efforts made by people.

3. Reinforcement of various skills and abilities possessed by team members and improvement of their professional skills. Team leaders are expected to encourage their members to take risks, learn, develop and take on new tasks and roles. The most effective managers at this stage pay special attention to acquiring or improving those technical, functional and communication skills, other skills, including the ability to make quick decisions and work as a team, which are necessary for the team to work effectively and progress to the next, higher levels stages of its development.

4. Managing the team's relationship with its environment and removing obstacles that hinder the team's development and work. Team members treat the team leader as the person who is primarily responsible for managing the team's relationships with other members of the organization. The group leader is obliged to protect the group, eliminate obstacles to its work, and obtain resources necessary for the team's work, if necessary.

5. Creation of opportunities for improvement of team members. Team leaders are expected not to use the best resources to enhance their own reputation, but to help the growth and development of team members by allowing them to take on additional commitments and guaranteeing them job rewards.

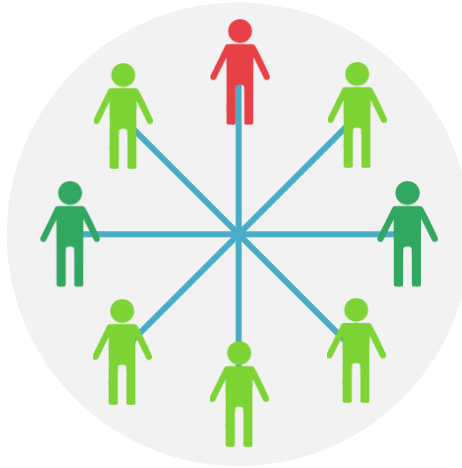
6. Performance of real work. Each team member, including the team leader, is expected to do approximately the same amount of work. Team leaders distance themselves somewhat from rank-and-file members, but do not use their status to avoid work. The manager should contribute his labor to its activities and not transfer the work to others like other members of the team.

Stage 2. Transition period team. During the taking more and more responsibility of the team members for the daily management of its activities,

---

<sup>11</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [1–4; 12]

the role of the manager changes: he is more and more involved in coordination, less and less in control (Fig. 3).



**Fig. 3. Transition team model <sup>12</sup>**

Team members gradually take on specific tasks, such as finding and gathering information, establishing consensus in the group, resolving conflicts that arise in it, making decisions without the participation of middle managers, initiating changes in group policies, procedures and methods of daily work. The leader manages the group, coordinating the skills and actions of its individual members. In addition, he spends a lot of time not on tracking the daily activities of his people, but on obtaining resources for the team and managing relations with external groups.

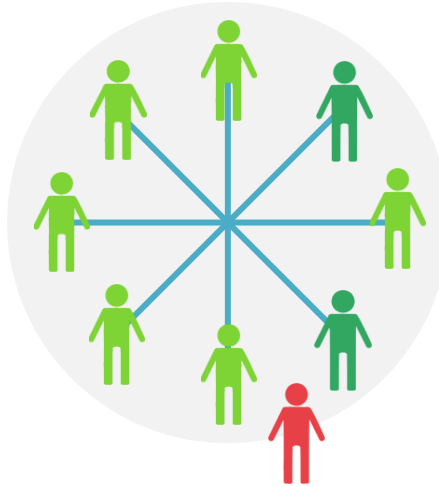
Stage 3. Experienced team. Team members take full responsibility for solving various problematic issues that they are already able to solve independently, based on past experience (Fig. 4). At this stage, the coordinator spends more and more time getting resources for his teams, mediating between them and other teams, as well as external clients. Teams mostly manage their day-to-day activities themselves, their coordinator may not delve into routine problems, not worry about how they react to them. Team members make decisions based on consensus and bear full responsibility for the most important parameters of the team's performance and effectiveness.

---

<sup>12</sup> Source: proposed and created by the authors and grouped by the authors based on the systematization of sources [12, p. 76–88]



The team leader, also known as the coordinator, acts as a senior manager who oversees the activities of several teams. Such a leader (coordinator) collects data on production, quality, customer satisfaction and other important indicators and informs team members about how they are doing.



**Fig. 4. Experienced team model <sup>13</sup>**

Stage 4. Mature team. At this final stage, the team bears full responsibility for its work. (Fig. 5). Team members solve most of the administrative, financial, and personal issues independently, plan their work, distribute roles and responsibilities, solve various technical and other problematic issues with minimal external intervention. The team coordinator allocates resources, and the team decides for itself when it needs help in solving social or technical issues, and what the amount of such help should be. At the request of the team, the coordinator (see Fig. 5) either provides it with personal assistance or uses external sources for this. In a mature team, during the work on a project, the project manager works with all executors, helps to increase competence, inspires and supports team members, creates a favorable environment for cooperation and exchange of ideas and knowledge. Good communication, training and mentoring enable employees to effectively help each other (see Fig. 5).

---

<sup>13</sup> Source: proposed and created by the authors and grouped by the authors based on the systematization of sources [12, p. 76–88]



**Fig. 5. Mature team model <sup>14</sup>**

This is an important prerequisite for ensuring the success of the project, because the executor who does not understand and is afraid stops doing the task normally, dissatisfaction and aggression accumulate and it can lead to negative consequences. And that's why the project manager must regularly tell the team about what is happening in the project. And then there is neither fear nor aggression but only tasks and problems that the team must solve together. The success of the team's activities is influenced by such factors as honesty; trust; mutual respect; recognition of team members<sup>15</sup>.

So, a number of factors influence the successful team formation process:

1. Degree of interdependence of members. If the tasks performed by the team are so closely interconnected that the work of one team member is critical to the work of others, then there is probably a need for a formal manager who regulates unsolved issues, holds meetings and ensures the participation of the right people in making the most important decisions. When the level of interdependence is low there is a greater likelihood that team members will establish external coordination on their own without the intervention of a formal leader.

2. Team sizes. As the size of the team increases, the number of relationships, decisions, points of view that need to be taken into account, and

---

<sup>14</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [12, p. 76–88]

<sup>15</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17]

in fact, the amount of planning, increases proportionally. Three people simply coordinate their actions without formal assistance. However, it is much more difficult for a team of 20 people to coordinate their actions. So, the larger the teams, the higher the likelihood that they will need people to play the role of formal leaders.

### 3. Functional (professional) diversity of team members.

The more representatives of different professions in the team, the greater number of points of view must be taken into account. Team members who perform different functions and types of work think about problems and approach them differently, so the integration of people with different professions may require the help of «translators» who have different professional training and act as managers. Over the last decade, professional roles in the field of information technology have changed and continue to change depending on the dynamics of business conditions and due to the rapid progress of technology. The main factors of these changes in the business sphere are globalization and the growing instability of the external business environment, the emergence of a global labor market and the restructuring of enterprises. Factors which are related to the field of information technology include a significant increase in the ratio «price/quality» for the most important technologies; the power of basic networks which is measured in gigabits and makes it possible to transmit voice, text, images at high speed; new paradigms of software development. Future specialists in the field of information technology must be able to operate at the intersection of business and technology. Their tasks will include not only providing timely and high-quality information but also participation in the innovation process.

4. Degree of team autonomy. The degree of team autonomy affects the complexity of information processing. If the team has the resources it needs, coordination and decision-making become its internal business. If the team is not autonomous i.e., connected to other teams and individuals, the complexity of processing information increases immeasurably. Sometimes integrating groups are sufficient to manage cross-teams but formal leaders may be necessary to manage complex cross-departmental functions.

5. Scale of changes. Any circumstances, including unforeseen technical difficulties, changes in organizational strategies, allocation of resources, unforeseen circumstances introduced by competition, can change the team's strategy. The more such deviations, the more difficult it is to make an informed decision. The team's ability to quickly and adequately respond to such situations can be increased if someone who can provide the team with critical information is nominated for the role of leader.

6. Technical skills and experience. The ability of the team to be responsible for the professional training of new people, as well as for compliance with technical standards, depends mainly on the work skills and experience of the

team members. The less experienced teams may need someone to act as a formal leader and provide technical direction.

7. Lifetime of the team. If people haven't worked in mature teams that are self-directed before, and the project the team is doing is short-term, it probably doesn't make sense to invest resources and spend time to develop the team completely. Instead, it can exist in the first stage with a designated leader who holds meetings, makes schedules, ensures fair distribution of work, and manages team relations. Empirically, it turned out that you should not leave people in the team for more than 5–8 years.

8. It should be additionally noted that not the last role in successful project management is played by the developed emotional intelligence of project managers (project managers), who need to build trusting relationships with the customer, team, and stakeholders and create effective project teams<sup>16</sup>.

Project leaders (managers) with developed emotional intelligence are able to recognize their own emotions and manage them effectively. This skill helps them to assess whether their emotions are useful or harmful to solve a particular situation. In addition, they are able to empathize with others and interpret both verbal and non-verbal cues such as body language. This ability can play a critical role in negotiating with stakeholders, especially when getting project approval or contracting.

Daniel Goleman (an American psychologist), in his 1995 book entitled «Emotional Intelligence “Why It May Matter More Than IQ»», created a framework of five elements that define emotional intelligence (Figure 6)<sup>17</sup>:

1. First, people with developed emotional intelligence have a heightened sense of self-awareness and have an understanding of their emotions. As a result, they are able to maintain control over their feelings and not let them dictate their actions. In addition, these people are confident in their abilities and trust their intuition. They are also able to objectively assess their strengths and weaknesses and work to improve in those areas where they may be lacking. Many experts believe that self-awareness is the most important component of emotional intelligence.

2. Self-regulation is those who have this ability are able to control their emotions and impulses. They are unlikely to become overly angry or jealous and are able to think before they act. People with self-regulation are usually thoughtful, able to adapt to change, have integrity and are not afraid to say «no» when necessary.

3. Empathy is the second most important component of emotional intelligence. It includes the ability to understand and identify with the desires, needs and views of other people. Empathetic people are able to recognize the

---

<sup>16</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [12, p. 76–88; 14]

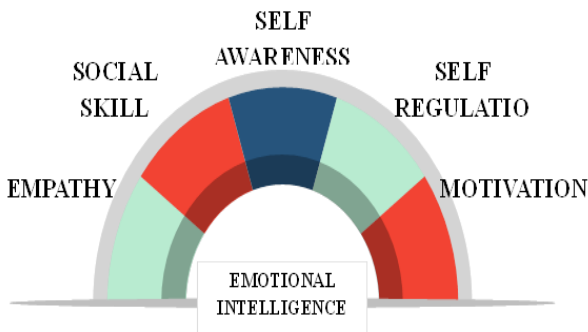
<sup>17</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [22]

feelings of others even when these feelings are not expressed clearly. This ability makes them excellent at managing relationships, communicating effectively and avoiding hasty judgments or stereotypes.

4. Motivation is another characteristic of people with high emotional intelligence. They strive to achieve their goals and are ready to make short-term sacrifices for long-term success. These people, as a rule, are very productive, successfully cope with the tasks and are effective in everything they set out to do.

5. Finally, people with high emotional intelligence tend to have strong social skills. They are easy to talk to and are often liked by those around them. These people are team players and put the development and success of their environment as the main task. They know how to deal with conflicts, build and maintain relationships<sup>18</sup>.

Possession of the skills which are presented in Figure 6 is crucial for any true leader – manager, top manager, in particular project manager, as they must interact with various stakeholders, cooperate with various teams and lead them to achieve satisfactory results. Emotional intelligence helps managers create trusting relationships and effective teams.



**Fig. 6. Five elements that define emotional intelligence (Daniel Goleman's model)<sup>19</sup>**

Anthony Mercino adapted Daniel Goleman's model of emotional intelligence (Fig. 6) specifically for project managers and emphasized the most important competencies required for project management (Fig. 7).

As you can see, Anthony Mersino added a new element to Daniel Goleman's model (see Fig. 6) – «team leadership» (see Fig. 7) to emphasize the importance of effective team leadership. Anthony Mersino's definition of

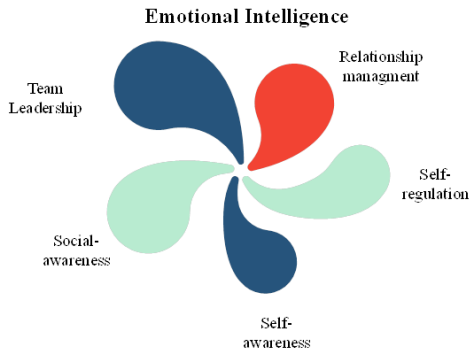
<sup>18</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17]

<sup>19</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [16]

emotional intelligence is more practical, it shows that understanding your own and other people's emotions will increase your effectiveness.

Any motivated project manager should not only take care of professional skills, learn new methodologies and apply them but also try to create a strong and successful team.

What makes teams stronger and stronger? Good internal collaboration is one of the key aspects that help teams cope with complex tasks and face any obstacles. A cohesive team is the dream and goal of any project manager.



**Fig. 7. Mercino model Emotional Intelligence Interpretation<sup>20</sup>**

Formation and development of the project team is an important element of operational and project management. An effective team helps to achieve project success by providing common direction, cooperation and mutual assistance. To form and develop a project team, it is necessary to correctly select participants, ensure clarity of roles and responsibilities, promote common focus, improve communication and cooperation, provide support and development, and motivate team members.

An effective project team ensures the success of the project through a common focus, established cooperation and mutual assistance between participants. The main principles of the formation and development of the project team include:

1) Correct team selection. It is important to identify the necessary competencies, skills and experience to successfully fulfill the roles in the project. When selecting team members, their professional baggage, motivation, communication skills and ability to work in a team, and their psychotypes should be taken into account.

---

<sup>20</sup> Grouped by the authors based on the systematization of sources [12; 18]

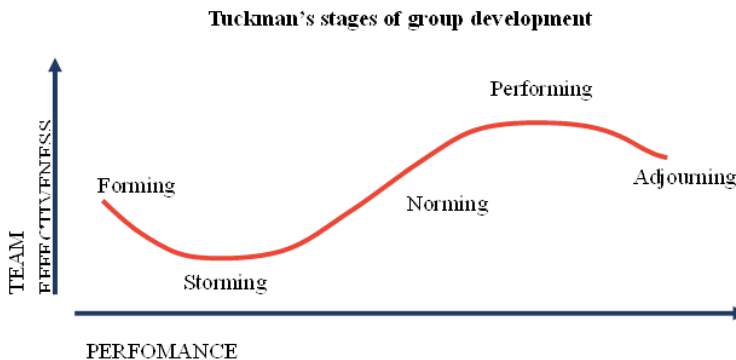
2) Clarity of roles and responsibilities. Each team member must have a clear role and know their duties and responsibilities. It helps to avoid unnecessary duplication of work, improves coordination and provides clarity in project management.

3) Joint orientation. Team members must have a common understanding of the project's goal and a common focus on achieving goals. It can be achieved by setting clear goals, agreeing on a strategy and giving all participants the opportunity to express their ideas and suggestions.

4) Communication and cooperation. Effective communication is an important factor for team success. Regular meetings, open exchange of information, joint decision-making and mutual support contribute to improved communication and cooperation within the team.

5) Support and development. The team needs management support: providing resources, education, training and development opportunities, all to help team members expand their skills and use them on the project. Keeping team members motivated is an important factor in maintaining efficiency and satisfaction. Supporting the achievement of goals, recognizing successes, encouraging development and ensuring equal distribution of work help to keep the team motivated.

Some experts, in particular Bruce Tuckman, believe that the effectiveness of most teams after the start of their activity decreases to the level that characterized the stage of team formation. Real gains in efficiency can only come after 18 months. The team must go through four predictable stages: formation, «overcoming the storm», return to the norm, normal activity (Fig. 8):



**Fig. 8. Team building Stages (group development) by Bruce Tuckman<sup>21</sup>**

<sup>21</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [8; 12]

1. Formation (Fig. 8). A period of nervous excitement should be expected at the beginning of team formation. People selected for the team will be proud of it, but at the same time they will be constantly interested in the questions: «What is expected of me?», «What are the rules?», «What should I do?». The stage of formation is the stage of research and study. Along with the excitement caused by a new situation, people feel self-doubt. Each team member evaluates the abilities and positions of others. Experts warn that one should not expect special achievements and the stage of formation from the team.

The success of the formation stage is determined by the following measures:

- 1) help team members get to know each other;
- 2) give the team a clear direction and goal;
- 3) to involve team members in the development of plans, agreement of roles, determination of methods of joint activity;
- 4) provide the team with the information necessary to start work.

2. «Overcoming the storm». At this stage, one gets the impression that things are getting worse in the second stage. Group members lose calm and patience because of lack of success and are eager to work, but do not know how to achieve results. Everyone begins to understand that it is much more difficult to achieve success in a team than it seemed before. People feel dissatisfied with joint work, worry, and are angry with themselves and their colleagues. This is a period of accusations and defense against them, lack of unity, tension and hostility. People start to be suspicious of each other. Subgroups are formed. Clashes occur between rivals competing for influence. The team struggles to define its goals, roles performed by team members. Productivity sometimes decreases, sometimes increases. It is how the team goes through the most difficult stage – the storm stage., it is proposed to overcome this stage successfully<sup>22</sup>:

1) solve issues of power and authority, for example, do not allow situations in which the power of one person equalizes the labor contribution of another;

2) develop and implement an agreement on the decision-making procedure;

3) adapt the role of the leader in such a way that the team can become more independent, encourage team members to take on more and more responsibility and new obligations.

3. Return to standart. At this stage, things begin to improve. The team develops some basic rules (or norms) that regulate joint work. People start to understand that their strength is in unity. Gradually, they even begin to love their team, to feel a stronger sense of belonging to the team. A sense of community arises which is expressed by the concept of «we». People become

---

<sup>22</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [8–12]



proud that they are part of a certain system, instead of competing, they begin to cooperate. People concentrate their attention and energy on strengthening the relationships formed in the team and show an interest in maintaining peace. However, overall labor productivity remains low.

It is recommended in order to guide the team through the normalization stage:

- to use the skills fully, knowledge and experience of team members;
- encourage people to respect each other and reciprocate respect;
- encourage team members to cooperate.

4. Normal activity. The team gains confidence in its capabilities. People agree on what the team is and what it is trying to achieve. The group develops rules and procedures for communication, conflict resolution, resource allocation, begins to apply these standards and understand its place in the organization where it works. Team members exchange information and ideas freely and productively. Conflicts are directed to the positive, problems related to work are solved creatively. The team begins to be proud of their achievements. The final stage involves the implementation of the following measures:

- 1) renew the procedures and methods that ensure cooperation;
- 2) help the team to understand ways of managing change;
- 3) act as a representative and defender of the team in relations with other groups and outsiders;
- 4) monitor work progress and celebrate successes.

Therefore, it is important to use modern operational technologies for establishing effective communication, conflict resolution techniques and methods of ensuring team cohesion for the effective management of the project team, like any team. An example of this technology is the methodology of «team houses» (Team Building Methodology), which is based on the idea that in order to achieve the maximum result in project work, the harmonious work of all team members is necessary, as well as on the idea of a team as a house. «Team houses» consist of various parts: these are walls, roof, foundation, windows, doors, etc. Each part has its own role but only together they form a functional house. The «team house» methodology includes a variety of training sessions designed to strengthen relationships between its members, improve communication, and ensure better project execution. These can be trainings on work planning and coordination, other trainings, games and exercises for the development of cooperation, communication and trust, exercises for the development of creativity, design thinking, etc. The technique can be applied at any stage of the team's work.<sup>23</sup>

It is worth stating that the use of modern methods of motivation can also contribute to increasing team productivity. A motivated and self-directed team has

---

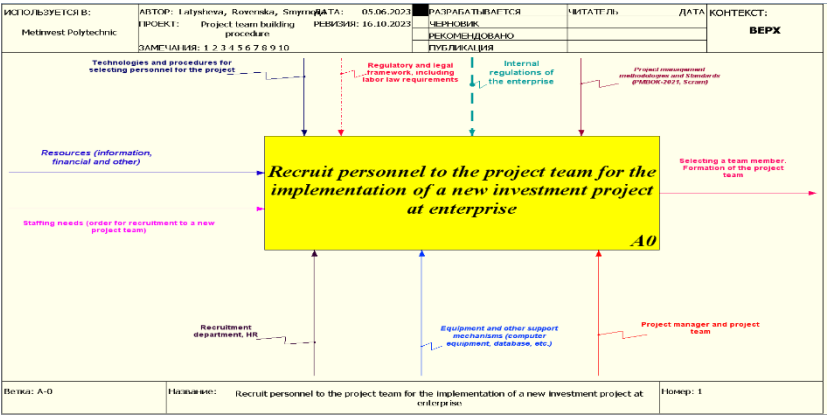
<sup>23</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [4; 5]

a higher energy level, greater interaction and a sense of responsibility for the result. One of the effective methods of motivation is to provide an opportunity to learn new technologies and tools, to develop one’s professional and flexible skills and abilities. This will help not only to increase the productivity of the team but also to increase the level of satisfaction of project participants with their work.

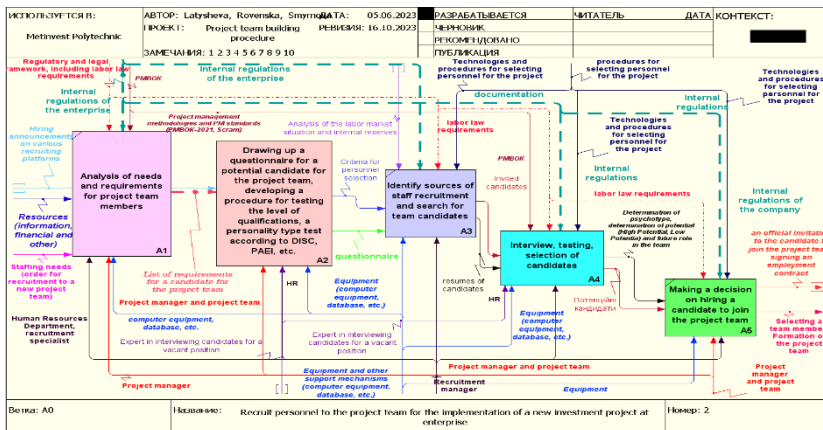
In this context of determining the possibilities of creating favorable conditions for the effective work of the project team, it is advisable to carefully select candidates for the project team. If you imagine the first stage of this project team building procedure as a standart business-process of selecting a candidate for a project team, then its visualization can be presented as a functional context diagram with its decomposition in the notation (modeling language) IDF0 (Integration Definition for Process Modeling) on the RAMUS modeling platform (Fig. 16 and Fig. 17).

The result of applying the IDEF0 methodology is a model (see Fig. 16 and Fig. 17). The model (see Fig. 16 and Fig. 17) consists of diagrams, fragments of text and a glossary, which have links to each other that allows to regulate the stages and formalize the entire procedure.

The diagram model of the first level of the procedure decomposition for selecting a candidate for the project team is intended for the formalization and description of business-processes. A distinctive feature of IDEF0 as a modeling notation (language or standard) is its emphasis on object subordination.



**Fig. 16. Parent diagram model of the higher level of the procedure for selecting a candidate for the project team**  
*Source: proposed and created by the authors in IDF0 (IDEF zero) notation on the RAMUS simulation platform*



**Fig. 17. Child diagram model of the first level of procedure decomposition for selecting a project team candidate<sup>24</sup>**

The IDEF0 notation considers the logical relationships between the stages (processes, subprocesses) of the candidate selection procedure for the project team as a set of modules, in which, at the same time (see Fig. 16, Fig. 17):

- the input arrow always comes to the left edge of the activity (of the main top diagram (see Fig. 16), or of the stage (see Fig. 17), and shows objects such as information and material flows (resources, certain tasks) that are transformed into business processes;
- control arrow (from top to bottom) is control and regulation mechanisms (in the form of instructions, regulations, methods, standards, i.e. all information flows that are transformed into processes that are required for their execution) arrows always enter the upper edge of the block (stage),
- the arrow of the provisioning mechanism (from bottom to top) – the bottom edge, which reflects the tools and resources with which the business process is implemented (for example, technical means, people – executors of the process, equipment, software and information systems, etc).
- the exit arrow (the result obtained from the transformation of input resources and prepared documentation) is the right edge of the block.

With the help of IDEF0 (see Fig. 16, Fig. 17) it is possible to carry out decomposition to the required level, which allows you to imagine the system in a form that is convenient for perception, and accordingly evaluate its complexity thanks to the visual display of all elements with the help of which the business process is implemented. This makes it easy to familiarize all stakeholders with the process, to identify problem areas. Clarity and simplicity of the IDEF0 graphic language make the «AS IS» model easy to read even for

<sup>24</sup> Source: proposed and created by the authors in IDF0 notation on the RAMUS simulation platform

people who did not participate in the project, as well as effective for demonstrations and presentations.

The «AS IS» model («as it is») is a model of the current state, which makes it possible to analyze ongoing processes, as well as systematize processes (stages of work) and information resources used to determine the need for certain changes (see Fig. 16, Fig. 17).

The «AS IS» model makes it possible to identify bottlenecks (duplication of functions, redundant document flow, etc.) in the organization of the procedure and the interaction of business processes, and the need for certain changes in the existing structure is determined. In the future, on the basis of the constructed «AS IS» model (see Fig. 16, Fig. 17), the stages of the business process execution procedure can be rethought and new models (so-called «TO BE» and «SHOULD BE» aimed at changes in the system, i.e. the desired or target state of the implementation process are described) programs and projects to improve operational efficiency.

In the context of the necessity for the right selection in the project team, it is worth paying attention that the project team can consist of different people with different psychotypes, which can affect the way of communication, perception and response to information.

Understanding the psychotypes of team members according to the different DISC models<sup>25</sup> and the PAEI model helps to allocate roles and tasks, taking into account the strengths and characteristics of each member. It is important to remember that these models provide a general overview of psychotypes and cannot fully describe each personality.

The DISC personality type test is a four-sector behavioral model for studying people's behavior in an environment or a certain situation. Psychologist William Marston's model (William Marston DISC model) examines behavior styles and behavioral preferences. At the same time, the DISC system does not evaluate a person's mental abilities (IQ), emotional intelligence (EQ), is not a tool for identifying human values, does not evaluate education, abilities and experience. In addition, the DISC test is the #1 commercial personality assessment tool, with over 80% of Fortune 500 companies using the DISC personality test. This DISC test (we recommend taking this test for free online at the link: <https://factum-info.net/uk/tests/1144-test-disc-opredelite-vash-povedencheskij-tip-lichnosti>, the key to the DISC test is generated automatically in the transcript of the test) will help to learn about belonging to a certain personality type, so that you can study the strengths and weaknesses of each psychotype, their typical behavioral markers and appropriate recommendations for improving communication skills. If we talk about the work of an HR manager, having this typology will be useful during an interview, in the process of adapting a

---

<sup>25</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [19]

new employee, drawing up motivational programs, as well as during evaluation and training.

The DISC typology works successfully in business, the military, and interpersonal communication. This knowledge is applied in business, sales and business communication even now. The main advantage of typology is quick diagnosis and identification of personality type during communication. With proper skill, it is enough to talk with a person for 10-20 minutes to understand his type and motives of behavior. Followers of William Marston depicted the DISC model<sup>26</sup> in the form of a «Marston cross» (Fig. 8):

4 squares filled with the intersection of the axis (perception and reaction) reflect 4 behavioral types.

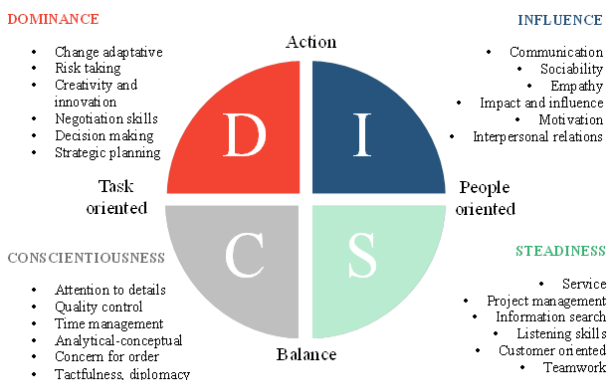
They are all encrypted in the DISC model name:

D (Dominance) – Dominant: how a person reacts to problems and challenges;

I (Influence) – Which influences: how a person interacts, influences others; S (Steadiness) – Stable: how a person reacts to changes;

C (Compliance) – Corresponding (or Conscientious):

how a person follows the rules: «Pure» types are quite rare as in any typology. As a rule, each of us has characteristics of each type, but one will dominate. Each type has its strengths and weaknesses (Fig. 8). Awareness of them helps people to reveal their talents and establish constructive business relationships. Belonging to different behavioral types can cause misunderstandings and conflicts.



**Fig. 8. William Marston model DISC<sup>27</sup>**

<sup>26</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [19]

<sup>27</sup> Source: created by the authors based on the systematization of sources [19]

What else is the DISC system useful for? Currently, testing according to this system is popular as part of staff management courses. If interlocutors or employees relate to different behavioral types, there may be disagreements between them. Knowledge of behavioral personality types (table 4), which include those around you, work colleagues and even friends, allows you to better build relationships, avoid unpleasant situations and, most importantly, achieve desired goals. It is especially useful to know your own personality typology in order to qualitatively assess your strengths and weaknesses, to understand in which direction to work on yourself.

The DISC personality type test (Table 4) is used to help HR and/or the manager correctly determine the psychological compatibility of employees' personality types. It is important for the management of the company to know the ways of forming psychological compatibility in the team, and to apply this knowledge during training, studying and placement of staff for the successful functioning of the company.

The DISC method helps to form an optimal team or «boss-subordinate» link. In addition, the compatibility of personality types does not mean the coincidence or complete similarity of the skills and abilities of employees, the principle of complementarity of professional qualities and knowledge works here. Moreover, the DISC typology helps the employee to understand his behavior and his potential.

For understanding of each behavioral type (table 4) manifests itself in work, let's imagine a situation where the company plans to switch to work on a new IT program platform.

For understanding of each behavioral type (table 4):

D thoughts: «Great, we will be able to work faster, support more clients and make more profit.»

I thoughts: «Almost all big companies work in this program. We need to keep the brand and also use modern technologies.»

S thoughts: «The program is quite simple and clear, I think my colleagues and I will quickly get used to working in it.»

C thoughts: «The cost of buying the program is so many dollars. So, if employee productivity increases by 15%, it will pay for itself in six months. But there is a risk that employees will find it unusual to work in it and, on the contrary, the speed of work will decrease.»

So, for «reds» the result is important, for «yellows» is «coolness» (external entourage), for «greens» are satisfaction and convenience for everyone, for «blues» are facts and figures.

Another PAEI model (Producer, Administrator, Entrepreneur & Integrator) was developed by Hugo Minziberger and describes four main roles in the team (Fig. 9): Producer (producer), Administrator (administrator), Entrepreneur (entrepreneur) and Integrator (integrator).

Table 4  
Interpretation of the DISC test about the main characteristics of each behavioral type<sup>28</sup>

To type DISC	Red - Dominant (D)	Yellow - Impact (I)	Green - Stable (S)	Blue - Conscientious (C)
<b>Characteristic</b>	<b>D - leaders - managers</b> , rather authoritarian people who know what they want and are not very used to listening to someone else's opinion; impatient, risky, prone to quick, not always thought-out decisions; highly value their time, are not inclined to trust and compassion; make decisions quickly; have a rough form of communication, straightforward, firm and self-confident; they like to tell others what to do, give commands; very purposeful, ready to achieve their goal, no matter what it costs them; strive to overachieve in order to prove themselves. They try not to stand still, they need results and progress.	<b>I - people</b> who are great at making new acquaintances, sociable; excellent specialists in public relations, they are everywhere, friendly, able to dissolve in any company; charismatic, trusting, impulsive, not attentive, not punctual; cheerful and full of optimism; they like to meet new people, they approach any business creatively; in the course of a conversation, they can jump from one subject to another without a visible logical connection, giving the impression of being superficial.	<b>S - team players</b> . Together they are capable of everything, but they absolutely cannot work alone. They are calm, gentle, patient, predictable, manageable, good workers, but practically unable to come up with or invent something on their own. Their greatest advantage is the inability to betray, you can rely on them in everything. It can be difficult to identify them, because they tend to adapt to the interlocutor. With such people-managers (usually a family business) there is often a "gray cardinal" who actually makes decisions.  They feel the need for reliability, stability and do not like sudden changes. At the same time, they pay great attention to relationships between people, showing tact, attention and cordiality to others.	<b>C - analysts</b> . People of this type work well with papers, they make good accountants, economists and lawyers. For them, the letter of the law and instructions are above all else. Emotionally closed, collected, organized. They are not prone to rash decisions; follow the rules and instructions; carefully analyze every detail before making a decision; often do not seek personal contact, so they can give the impression of being unemotional, cold; careful, demanding, neat, diplomatic, tactful.

<sup>28</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17–19]

Continuation of the table 4<sup>29</sup>

To type DISC	Red - Dominant (D)	Yellow - Impact (I)	Green - Stable (S)	Blue - Conscientious (C)
<b>Strengths</b>	work for results, quick reaction, active life position; always defend their opinion. They are comfortable in changing conditions, in challenging situations.	extraordinary thinking, creativity, love for everything new, benevolence, the ability to see others as partners, not rivals.	attentiveness to others, maintenance of perfect order in affairs and things, reliability, stability.	the ability to notice the smallest details and facts, systematicity, accuracy, order in everything, accuracy.
<b>Weak sides</b>	they find it difficult to approach people, they are too direct, they lack diplomacy. In the pursuit of the result, they forget details, do not pay attention to important nuances. In a state of stress, they tend to show aggression.	impulsiveness, dislike of details and figures, lack of punctuality. They often become obsessive in a state of stress.	docility, dependence, fear of change, reluctance to talk about problems, it is very difficult for them to say no. Under stress, it is characteristic of them to agree. They tend to be offended, but do not show their feelings, which often leads to psychosomatics.	excessive scrupulousness, tendency to condemn, lack of flexibility. They react to stress by withdrawing into themselves, closing themselves off.
<b>Markers of behavior of this type:</b>				
<b>Need:</b>	result.	new impressions.	reliability.	information.
<b>General impression</b>	extrovert, purposeful.	extrovert, the soul of the company.	introvert, calm	introvert, purposeful
<b>Way of communication</b>	direct.	flexible, non-specific.	evasion.	direct.
<b>Extrane manifestation</b>	irritability, temper.	disorganization, non-obligation.	possession, morbid attachment.	critic, skeptic.
<b>Gesticulation</b>	active, wide gestures.	active, expressive, with many facial expressions.	moderate gestures.	inactive, few gestures.
<b>Pace</b>	fast, directed.	smooth, confident.	flat, not fast.	smooth, not fast.

<sup>29</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17–19]



Continuation of the table 4<sup>30</sup>

To type DISC	Red - Dominant (D)	Yellow –Impact (I)	Green – Stable (S)	Blue - Conscientious (C)
<b>Tips for the manager or HR on the interview procedure</b>	At the interview with the "reds", it is important to give them the opportunity to take the initiative, not to give in to their pressure, speak confidently, and show your professionalism and competence in the matter. For D, status is important. Show the strengths of your company, the importance of the position, the challenge of the assigned tasks. A decent reward for the result is also of great importance, emphasize this.	During an interview with "yellows", it is important to remember the purpose of the interview. Pay attention to their charm, but control the length of the conversation and direct it in the right direction. Monotonous work will quickly get boring and can lead to demotivation of the employee. Employees with a high I-score will be most effective in performing tasks that require a creative approach and development of ideas. Often, "yellows" become informal leaders in the company, because they will bring value in the form of creativity, motivation of others to achieve results, and the ability to solve conflicts. They are great team players.	It is very important to create a warm atmosphere at an interview with "greens". Make sure the candidate is comfortable. In the presentation of the vacancy, emphasize the description of the team: friendly relations, support in education and work, a favorable social and psychological climate. During the first period of work in the company, it is important that such an employee has a mentor.	At an interview with "blue" people, it is important not to show too much emotion, it makes them wary. In conversation, it is better to use facts, statistics, figures, structure information, speak directly, "without water". Be prepared for the fact that the candidate will write down many points of your conversation in a notebook. He will show himself well in positions that require attention, systematicity, persistence, for example, personnel inspector, proofreader, accountant. Their value to the company: development and maintenance of high standards, thoroughness in work, testing of information, systematization of material.
	D can be good managers, formal leaders. Their value to the company: profit-oriented, good organizers, easily accept a challenge.		S will prove themselves excellently in work related to team building, unification of people, with an individual approach to employees. Their value to the company: good team players, working to achieve a common goal, patient, high level of empathy, loyal to the company.	

<sup>30</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17–19]

Continuation of the table 4<sup>31</sup>

To type DISC	Red - Dominant (D)	Yellow – Impact (I)	Green – Stable (S)	Blue – Conscientious (C)
<p><b>How to apply the DISC typology in sales and business:</b></p> <p>Knowing what is important to each DISC personality type and what they pay the most attention to can create effective buyer-seller communication.</p>	<p><b>Buyer D</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Be specific and direct</li> <li>• Offer alternatives</li> <li>• Don't dictate your terms, let them choose</li> <li>• Have a reasoned discussion and be confident</li> <li>• Be factual, but don't overload with information</li> </ul> <p>For the "reds" is an important the result</p>	<p><b>Buyer I</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Be friendly, smile, joke</li> <li>• Build friendships</li> <li>• Allow them to express themselves</li> <li>• Listen with attention and interest, acknowledge them</li> <li>• Use emotionally charged words when describing the product</li> <li>• Exchange contact details and keep in touch after the deal</li> <li>• Coolness, external entourage is important for yellow people</li> </ul>	<p><b>Buyer S</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Take your time, give yourself time to make a decision</li> <li>• Provide the necessary guarantees</li> <li>• Teach logically and consistently</li> <li>• Be sincere and earn their trust</li> <li>• Gently push to the desired solution</li> <li>• Satisfaction and convenience for everyone is important for green people</li> </ul>	<p><b>Buyer C</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Give more accurate data about the products: facts, figures and evidence</li> <li>• Answer all questions consistently, without using general phrases</li> <li>• Do not push or rush, be patient</li> <li>• Respect personal space, keep your distance</li> <li>• Stay in control, don't be skeptical</li> <li>• Facts and figures are important for blue people</li> </ul>

<sup>31</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [17–19]

Each role is responsible for certain functions and has its own characteristics. Producers are usually focused on completing tasks and achieving results. Administrators are focused on organization, structure and processes. Entrepreneurs are characterized by innovation, risk and vision of opportunities. Integrators provide coordination, cooperation and conflict resolution.

The psychotypology understanding of project team members (see Fig. 9) to help ensure more effective communication and collaboration.

Here are some general tips for working with different psychotypes (see Fig. 9):

1. Understanding: try to understand what psychotypes are present in the team and how they affect the way they perceive and respond to information.

2. Communication: use an adaptive approach to communication, taking into account the needs and styles of each psychotype. Be clear, specific, and direct with those in the Dominance category. Look out for engagement and support for those in the Influence category. Be patient and supportive of those in the Steadiness category. Be organized and precise in communication with those who belong to the Conscientiousness category.

3. Distribution of roles: consider the distribution of roles in the team, taking into account the PAEI model. Ensure balance between production, administrative, business and integration functions.

4. Mutual support: promote mutual support and communication between different psychotypes in the team. Encourage collaboration and mutual learning.

- Hi-po (High Potential) refers to employees who have high potential for growth and development in the future. These can be individuals with high skills, motivation and leadership abilities.

- Low-po (Low Potential) means that the employee does not show a high potential for development or growth in the organization. This does not mean that such employees cannot be valuable team members, but their opportunities for career growth may be limited. There are three main components that help reliably identify the right candidates.

It is worth evaluating Hi-po (High Potential) according to the following criteria:

- 1) Assessment of the desire for achievement gives us an answer as to whether the HiPo can take a higher and more difficult position, be successful in his further career, or whether his motivation is strong enough to overcome difficulties on the way to achieving the result.

- 2) Aptitude Assessment provides insight into whether our HiPo has the competencies needed to perform more complex roles.

Process		FOCUS		Results		
Unstructured	<b>ESFJ</b> WORLD'S HOST Gracious – Good People Skills – Thoughtful – Appropriate Eager to Please <i>MOST HARMONIOUS</i>	<b>ENFJ</b> SMOOTH OPERATOR Charismatic – Compassionate Possibilities for People – Optimistic Idealistic <i>MOST IDEALISTIC</i>	<b>ESTJ LIFE ADMINISTRATOR</b> Order & Structure – Sociable Opinionated – Results Driven Producer Traditionalist <i>MOST HARD DRIVING</i>	<b>ENTJ</b> 'NATURAL' LEADER Visionary – Gregarious Argumentative Systems Planner – Takes Charge Low Tolerance for Incompetence <i>MOST COMMANDING</i>	Global	
	INTEGRATOR		ENTREPRENEUR			
	<b>ESFP</b> YOU ONLY GET ONE LIFE Sociable – Spontaneous – Loves Surprises – Cuts Red Tape – Juggle Multiple Projects – Quip Master <i>MOST GENEROUS</i>	<b>ENFP</b> GO FOR BROKE People Oriented – Creative Seeks Harmony – Life of the Party Initiator – Cheerleader <i>MOST OPTIMISTIC</i>	<b>ESTP</b> ULTIMATE REALIST Unconventional Approach – Fun Gregarious – Live Here and Now Good at Problem Solving <i>MOST SPONTANEOUS</i>	<b>ENTP</b> CHALLENGE CHASER Argues Both Sides of an Issue Brinksmanship – Tests Limits Enthusiastic – New Ideas <i>MOST INVENTIVE</i>		
	ADMINISTRATOR		PRODUCER			
APPROACH	<b>ISFJ</b> DUTY BOUND Amiable – Works Behind the Scenes Ready to Sacrifice – Accountable Prefers Doing to Talking or Thinking <i>MOST LOYAL</i>	<b>INFJ</b> INSPIRATIONAL Reflective & Introspective – Quietly Caring – Creative – Linguistically Gifted Sensitive Psychic <i>MOST CONTEMPLATIVE</i>	<b>ISTJ</b> JUST DO IT Organizer – Compulsive – Private Trustworthy – Rules n'Regs – Practical <i>MOST RESPONSIBLE</i>	<b>INTJ</b> 'IMPROVES' EVERYTHING Theory Based – Skeptical – 'My Way' High need for Competency Sees World as a Chess Game <i>MOST INDEPENDENT</i>	PERSPECTIVE	
	ADMINISTRATOR		PRODUCER			
	<b>ISFP</b> SEE MUCH –SHARE LITTLE Warm & Sensitive – Unassuming Short Range Planner – Team Player In touch with Self & Nature <i>MOST ARTISTIC</i>	<b>INFP</b> NOBLE SERVANT OF ALL Strict Personal Values – Seeks Inner Peace and Order – Creative – Non Directive – Reserved <i>MOST IDEALISTIC</i>	<b>ISTP</b> TRY ANYTHING ONCE Very Observant – Cool & Aloof Hands-on Practicality – Unpretentious – Ready <i>MOST PRAGMATIC</i>	<b>INPT</b> PROBLEM SOLVER Challenges others to think Absent Minded Professor Demands Compete – Socially Cautious <i>MOST CONCEPTUAL</i>		
	ADMINISTRATOR		PRODUCER			
Structured	Slow	PACE		Fast		Local

**Fig. 9. PAEI Model – Producer, Administrator, Entrepreneur & Integrator – A Powerful Model to create New Teams by Hugo Minzberger<sup>32</sup>**

Stuff can also be evaluated in another model based on the level of potential, according to psychotypes with high (High Potential, Hi-po) and low potential (Low Potential, Low-po) are distinguished, namely:

Martyrdom score indicates how loyal the Hi-Po is to the company and considers it the best place to realize their career ambitions<sup>33</sup>.

<sup>32</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [23]

<sup>33</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [24]

Another well-known staff typology system – the so-called «ABC players» model – is used to classify employees according to their productivity and contribution to the organization.

- A players (or top performers) are employees who have demonstrated high results and made a significant contribution to the development of the organization.

- B players are employees who perform their duties at a satisfactory level, but do not achieve exceptional results.

- C players are employees who have performance problems and do not meet the organization's expectations.

And another common evaluation system «Exceed – Meet – Below expectations» allows to evaluate employees taking into account their actual contribution and performance. It helps identify employee strengths and weaknesses, identify training and development needs, and set clear goals and expectations for future work. Each employee will be evaluated individually depending on their specific duties and goals. The application of such an evaluation system will contribute to a balanced and fair evaluation of employees and will contribute to the development of a highly effective team.

This «Exceed – Meet – Below expectations» evaluation system is based on the extent to which team members meet or exceed the expectations placed on them at work:

- Exceed expectations are employees who demonstrate high productivity and achieve or exceed the goals set for them.

- Meet expectations (meet expectations) – these are employees who perform their duties at the accepted level and achieve the set goals.

- Below expectations (below expectations) are employees who do not perform their duties at the appropriate level or do not achieve the set goals.

Selection of people for the team is usually carried out based on psychotypes, skills and knowledge of employees, personal qualities and characteristics. When working in a team, each employee fulfills two roles. The first of them is the most obvious – a professional role. The second role is a team role based on personal data.

Raymond Meredith Belbin<sup>34</sup> (table 5) in his research identifies nine team roles, the characteristics of which are given in table. 5. The roles presented should be used according to the needs and best practices of the team. For example, at the initial stage of the team, there is a need for the generation of innovative ideas (idea generator), and then for an executor who performs the task. The «head» coordinator plays an important role in achieving success at these stages. The active activity of the «former» contributes to the development of the team's driving forces and incentives. «Resource explorer» becomes important in difficult negotiations. «Expert» is necessary to maintain the focus of the team (see Table 5). Team leaders should know the specifics

---

<sup>34</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [15]

of team roles (see table 5) of their employees so that the team can use all the variety of roles. In teams with an insufficient level of trust and openness, there may be people who do not discuss their professional skills and close themselves to personal qualities. In organizations, there is usually a constant turnover of stuff, and the concept of roles can be used in the formation of teams. It is worth stating that each team member can perform one or more team roles (see table 5), each of them has its own advantages and «acceptable disadvantages». It is important to understand them and try to focus on the strengths of employees. When employees see that their flaws are accepted, they become more open to exhibiting qualities that are useful to the team.

A team has a better chance of success if it is balanced in the selection of team roles and each role (Table 5) is performed at the right time to solve joint tasks. It is important to be tolerant of the shortcomings of individual team members and learn to manage them. It is the team leader who plays an important role in uniting employees, and therefore he must create favorable conditions for the work of subordinates. The leader's style of behavior, focused on personal relationships, is also of great importance (Table 6).

Table 5

**Team Roles by Raymond Meredith Belbin (R. Meredith Belbin, 1981)**

<b>Types of team members roles</b>	<b>Necessary personal qualities and contribution to the team's activities</b>	<b>Acceptable defects</b>
«Resource Researcher»	Possesses the art of conducting negotiations, a variety of contacts, the talent of an improviser, studies favorable opportunities. Enthusiasm, sociability.	Loses interest as enthusiasm wanes. Jumps from one task to another. Requires increased external pressure.
«Former»	Constant focus on solving the task; stimulates the work of the entire team; encourages employees to work more intensively. Energy, desire to work with full dedication.	Easily becomes irritated. Impulsivity and impatience. Impatience with vague wording and indecision in behavior. The result at any cost.
«Collectivist»	Contributes to the harmonization of relations in the team, eliminates disagreements. Listens carefully to colleagues, relies on the points of view of others. Sensitivity, lack of excessive self-confidence.	Indecisiveness in crisis situations. Efforts to avoid escalation of situations. Can prevent a certain action at a crucial moment.
«Coordinator»	Clearly formulates goals; performs well as a presenter during discussions. Contributes to effective decision-making. Has good communication skills; social leader	May seem like a person prone to manipulation. Tendency to transfer one's responsibilities to others. Can take credit for the entire team.
«Specialist»	It is characterized by the presence of knowledge and skills that are rarely found. Purposefulness and the ability to fully devote yourself to work.	Useful only in a narrow professional field. Weakened and communication skills. Often does not see hidden problems.

Continuation of the table 5<sup>35</sup>

Types of team members roles	Necessary personal qualities and contribution to the team's activities	Acceptable defects
«Generator of ideas»	Creative orientation, rich imagination, extraordinary thinking. Craving for innovation. A source of original ideas for the team	Insufficient experience of interpersonal communication. Psychological instability. He lingers for a long time considering «interesting ideas».
«Performer»	Turns ideas into practical actions. Turns solutions into easy-to-do tasks. Brings order to the team's activities.	Insufficient flexibility. Inadmissibility of fantastic ideas and parts of changes in plans.
«Finisher»	Diligence and conscientiousness. Ensures that all tasks are completed in full. Monitors the timeliness of tasks.	Excessive concern about the current state of affairs. Propensity to internal experiences. Reluctance to delegate one's duties. Rejection of a frivolous attitude towards his duties by others.
«Expert»	Confesses a dispassionate and critical analysis of the situation. Strategic approach and transparency in assessments. Accuracy of judgments, efforts to consider all possible solutions.	Underestimation of factors of stimulation and inspiration. Lack of creative imagination and inspiration. The ability to knock others down by suppressing their initiative.

Table 6

**Positive types of team behavior<sup>36</sup>**

Activities	Actions of the leader
Putting forward proposals and initiatives	Offering ideas and methods of action related to the task being performed.
Development of ideas	Development of ideas put forward by others; the desire to «sacrifice» one's own offers.
«Guard functions»	«Opening the gate» – the desire to involve others in the discussion; «closing the gate» – the desire to restrain or stop the communication of others.
Diagnostic analysis	Analysis of shortcomings or their causes in a specific situation, organization of «brainstorming».
Encouragement of group work	Expressing friendly affection, support and sensitivity to others through verbal and non-verbal means.
Search and transfer of information	Finding and providing the right information, openness and honesty.
Conflict resolution	Willingness to accept the conflict and deal with it, take measures to eliminate a possible conflict of interests.
Evaluation «on merit»	Evaluation of the merits of proposals and their effectiveness, recognition of personal merits of team members.
Expressing thoughts and addressing feelings	Making appropriate judgments about everyone's contribution, acknowledging and understanding people's feelings.
Fulfilling of needs	Timely satisfaction of needs for amenities, rest, comfortable working conditions of the team.
Decision-making	Participation in decision-making on any proposal or course of action.

<sup>35</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [5; 12]<sup>36</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [1–12]

Staff development is a key aspect when implementing programs and projects to improve operational efficiency. There are some important elements that can contribute to the development of staff in a team:

1. It is important to create a motivating environment in which employees see the connection between their efforts and the achievement of organizational goals. It may include rewards, bonuses, increased responsibilities, or opportunity for achievement-based career development.

2. The organization of trainings and education allows staff to develop the necessary skills and knowledge to perform new processes and roles related to efficiency improvement programs. It can be both internal trainings and involvement of external experts.

3. Implementation of efficiency improvement programs may require changes in management and the creation of a team approach. Managers must be open to new ideas, able to improve processes and effectively manage a team. Developing leadership skills and helping to build an effective team can help in this process.

In general, successful staff development in implementing operational efficiency improvement programs and projects requires a combination of motivational activities, training and education, as well as leadership and team leadership development. These elements will help attract, motivate and develop staff to succeed in implementing performance improvement projects.

According to the project management standard PMBOK-2021 (seventh edition) (A Guide to the Project Management Body of Knowledge or PMBOK Guide -2021)<sup>37</sup> also is offered models of project team management, some of them were developed with a clear focus on projects and project teams, others are of a more general nature (Table 7):

Table 7

**Project team management model according to PMBOK-2021<sup>38</sup>**

Types of models	Explanation
I.	Commonly used models: whenever possible, models are presented as they are applied to projects. The content of this section does not describe how to design or create new models. The model descriptions provided provide a general overview. Project team members and other stakeholders can refer to many sources (such as the PMI Standards Library) for a more complete description and explanation of the models.
1. Situational leadership models are a subset of a wide range of leadership models.	just as project teams match processes, methods, life cycles, and development approaches, they also match leadership styles. Situational leadership models describe ways to adapt leadership style to the needs of the individual and the project team.
1.1. Ken Blanchard's Situational Leadership	measures the development of project team members using competence and commitment as two primary variables. Competence is a combination of abilities, knowledge and skills. Dedication shows a person's confidence and motivation. As a person's competence and commitment develop, leadership styles evolve from directing to coaching, and then to supporting and delegating authority to meet individual needs.

<sup>37</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21]

<sup>38</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21, p. 155–160]



Continuation of the table 7<sup>39</sup>

Types of models	Explanation
1.2. The OSCAR coaching and mentoring model was developed by Karen Whitworth and Andrew Gilbert.	<p>The model helps people adapt their coaching or leadership styles to support people with an action plan for personal development. The model considers five factors:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Final result (Output). The end result defines the person's long-term goals and desired outcome from each conversation.</li> <li>2) Situation (Situation). The situation provides an opportunity to discuss the project team member's current skills, abilities, and knowledge level, why the person is at that level, and how that level affects the person's performance and relationships with colleagues.</li> <li>3) Choices/consequences (Choices/consequences). Choices and/or consequences define all potential paths to a desired end result and consequences</li> <li>4) of every choice, so that a person can choose effective ways to achieve his long-term goals.</li> <li>5) Actions. Action focuses on specific improvements by focusing on immediate and achievable goals that a person can work towards within a specific period of time.</li> <li>6) Review (Review). Regular meetings provide support and ensure that people stay motivated and stick to the agreed plan.</li> </ol>
2. Communication models demonstrate concepts related to how the boundaries of the sender's and receiver's perceptions, as well as the communication environment, affect the effectiveness of communication, and what types of discrepancies exist between the expectations of end users and reality.	Due to the proliferation of multicultural project teams and dispersed stakeholders, these models provide an approach to consider communication styles and methods to improve its effectiveness and efficiency. There are many communication models that demonstrate different aspects of communication.
2.1. The communication model developed by Broweiss and Price	The model of intercultural communication contains the idea that the message itself and the way it is transmitted depend on the current knowledge, experience, language, thinking and communication styles of the sender, as well as stereotypes and relationships with the receiver. Likewise, the receiver's knowledge, experience, language, thinking, and communication styles, as well as stereotypes and attitudes toward the sender, will influence the interpretation of the message.

<sup>39</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21, p. 155–160]

Continuation of the table 7<sup>40</sup>

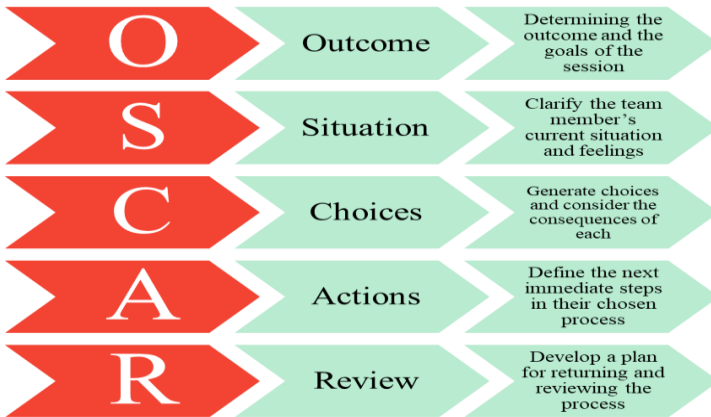
Types of models	Explanation
<p>2.2. A model of the effectiveness of communication channels by Alistair Cockburn, who developed a model describing communication channels along the axes of effectiveness and saturation.</p>	<p>According to the definition of Richard Daft and Robert Lengel, saturation is related to the amount of knowledge that can be conveyed by means of communication.</p> <p>The saturation of such a tool depends on the characteristics, in particular, on the ability to:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>process several information signals at the same time,</li> <li>promote quick feedback,</li> <li>set a personal focus,</li> <li>use natural language.</li> </ul> <p>Saturation of communication allows you to quickly transfer a wide range of information.</p> <p>Situations involving complex, confusing, and personal information benefit from richer communication channels, such as face-to-face communication. Situations involving the transfer of simple descriptive information may use less saturated communication channels, such as notes or text messages.</p>
<p>3. Motivation models</p>	<p>People work better when they are motivated, and people are motivated by different things.</p> <p>Understanding what motivates project team members and other stakeholders helps align incentives to specific people, thereby ensuring more effective engagement</p>
<p>3.1. Frederick Herzberg's two-factor model of the study of hygienic and motivational factors</p>	<p>Frederick Herzberg conducted a study of motivational factors in working life. He believed that job satisfaction and dissatisfaction arise from conditions called motivational factors.</p> <p>Motivational factors cover issues related to job content, such as achievement, growth, and advancement. An insufficient level of motivational factors leads to dissatisfaction.</p> <p>A sufficient level of motivational factors contributes to satisfaction. Herzberg also identified hygiene factors related to work, such as company policies, wages, and physical environment.</p> <p>If the level of hygienic factors is not sufficient, they cause dissatisfaction. However, even if their level is sufficient, they do not lead to satisfaction.</p>

<sup>40</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21, p. 155–160]

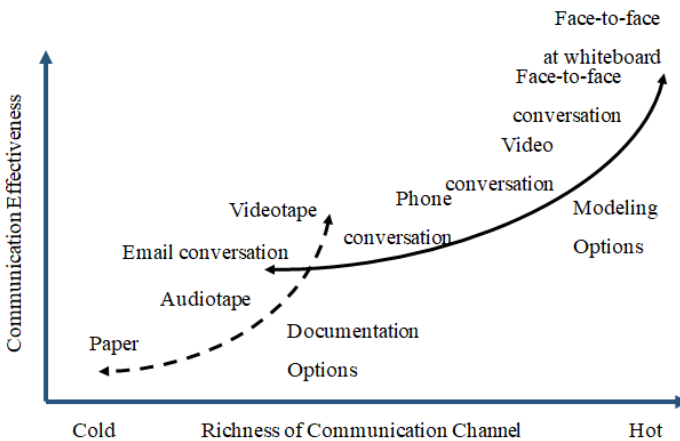
Continuation of the table 7<sup>41</sup>

Types of models	Explanation
<p>3.2. Daniel Pink's Model: Intrinsic vs. Extrinsic Motivation.</p> <p>Daniel Pink has published several books on the intrinsic factors that motivate people. He stated that although extrinsic incentives such as wages motivate a person to a certain extent, once a person is fairly paid for his work, the motivational power of extrinsic rewards ceases to exist. For complex and interesting work, like most project work, intrinsic motivators are much longer and more effective.</p>	<p>Pink identifies three types of intrinsic motivators: autonomy, mastery, and purpose:</p> <p>Autonomy is the desire to manage one's own life. This is consistent with being able to determine how, where and when work is done. Autonomy includes flexible work schedules, working from home, and working in project teams characterized by independent choice and self-management. Mastery is the ability to improve and improve. Aspects of mastery include the desire to perform well, to learn, and to achieve goals. Purpose means the need to make changes for the better. Knowing the project's vision and how the work contributes to that vision allows people to feel like they're making a difference.</p>
<p>3.3. The theory of needs is the model of David McClelland</p>	<p>Needs Theory – David McClelland's model states that all people are driven by needs for achievement, power, and affiliation. The relative strength of each need depends on individual experience and culture.</p> <p>Achievements: People motivated by achievement, such as achieving a goal, are motivated by challenging but meaningful tasks. Power: People motivated by power like to organize, motivate, and lead others. They are motivated by increasing the level of responsibility. Affiliation: People who are motivated by belongingness seek acceptance and belonging. They are motivated by being part of a team.</p>
<p>3.4. Theory X, Theory Y, and Theory Z (Douglas McGregor and William Ouchi model)</p> <p>Douglas McGregor developed the Theory X and Theory Y models, which represent a spectrum of employee motivation and corresponding management styles. The model was later extended by William Ouchi's Theory Z.</p>	<p>Theory X. The X side of the spectrum assumes that people work only to earn an income. They are not ambitious or goal-oriented, so they are best motivated by a practical and centralized approach. This management style is often found in manufacturing, labor-intensive environments, or environments with many levels of management.</p> <p>Theory Y. The Y side of the spectrum suggests that people are intrinsically motivated to perform well. The appropriate management style is more like personal coaching. The leader encourages creativity and discussion. This style of management is often found in creative and scientific environments.</p> <p>Theory Z Abraham Maslow viewed Theory Z as a transcendent dimension to work where people are motivated by self-actualization, values, and a higher calling. Optimal in this situation is a management style that cultivates awareness and meaningfulness. William Ouchi's version of Theory Z focuses on motivating employees by creating jobs for life that focus on the well-being of employees and their families. This management style aims to increase productivity, morale and satisfaction.</p>

<sup>41</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21, p. 155–160]



**Fig. 10. Model of coaching and mentoring OSCAR<sup>42</sup>**



**Fig. 11. Alistair Cockburn's model of the effectiveness of communication channels<sup>43</sup>**

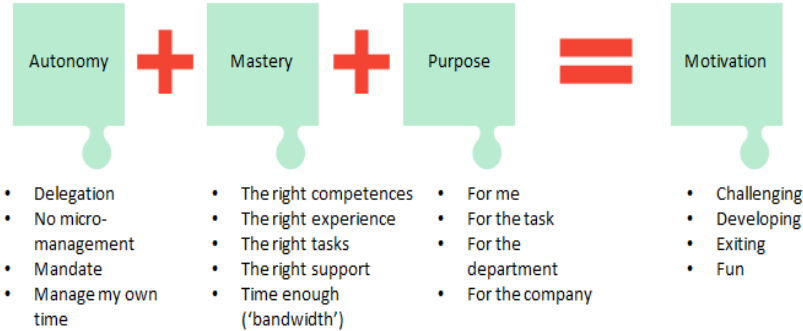
<sup>42</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [25]

<sup>43</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [21]

Herzberg's Two Factor Theory	
Motivators	Hygienes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Achievements</li> <li>• Recognition</li> <li>• Responsibility</li> <li>• Opportunity for advancement or promotion</li> <li>• The work itself</li> <li>• Potential for personal growth</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Salary</li> <li>• Technical supervision</li> <li>• Working conditions</li> <li>• Company policies, administration, and procedures</li> <li>• Interpersonal relationships with peers, supervisors, and subordinated</li> <li>• Status</li> <li>• Security</li> </ul>
<i>When increased, lead to greater satisfaction</i>	<i>When deficient, lead to greater dissatisfaction</i>

**Fig. 12. Frederick Herzberg's two-factor model<sup>44</sup>**

**Motivation – how do we do it?**



**Fig. 13. Daniel Pink's model<sup>45</sup>**

<sup>44</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [26]

<sup>45</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [27]

### McClelland's Human Motivation Theory

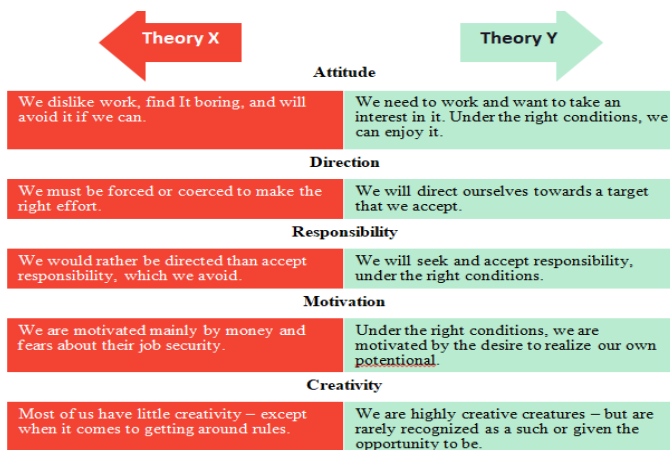
Identified three motivators

All three are present in each person, but one motivator will dominate

People will have different characteristics depending on their dominant motivator



**Fig. 14. Theory of needs – David McClelland's model<sup>46</sup>**



**Fig. 15. McGregor Theory X Y Model<sup>47</sup>**

To build a highly effective project team the manager needs to create a favorable business environment where team members work successfully and effectively interact with others i.e., such an environment that provides conditions for business communication and timely elimination of the causes of conflicts. For this, there are effective methods of conflict resolution.

The manager's activity algorithm in the process of conflict management depends on many factors: the content of the conflict itself, the conditions of

<sup>46</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [28]

<sup>47</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [29]

its occurrence and development, and many others. Therefore, it is impossible to offer a universal algorithm for the activity of a manager in conflict management, but some basic, expedient steps in such an algorithm can be highlighted. We list them in the table. 9.

Table 9

**Conflict management algorithm<sup>48</sup>**

Step	Contents of activity	Ways (methods) of implementation
1	Study of the causes of the conflict	Observation; analysis of activity results; conversation, study of documents; biographical method, i.e. study of biographical data of participants in the conflict, etc.
2	Limitation of the number of participants	Work with leaders in microgroups; redistribution of functional duties; promotion
3	Additional analysis of the conflict with the help of experts	Survey of experts; involvement of a mediator, a psychologist; negotiation process (mediation), etc.
4	Making a decision	Administrative methods; pedagogical methods.

Based on this conflict management procedure (Table 9), the following actions can be foreseen<sup>49</sup>:

1. Forecasting a conflict is a type of activity of a management entity aimed at identifying the causes of this conflict. The main sources of conflict forecasting are: the study of objective and subjective conditions and factors of interaction between people; study of their individual and psychological characteristics. For example: in a team, such conditions and factors can be: management style; the level of social tension; socio-psychological climate; leadership and microgroups and other social and psychological phenomena.

2. Conflict prevention (preventive form) is a type of activity of the management entity aimed at preventing the occurrence of conflict. Conflict prevention is based on their prediction. In this case, on the basis of the received information about the causes of the unwanted conflict, active activities begin to neutralize the effects of the entire complex of its factors. This is the so-called forced form of conflict prevention. However, conflicts can be prevented by implementing, in general, effective management of the social system. The main methods of such prevention of conflicts in organizations can be:

- constant concern for meeting the needs and interests of employees;
- selection and placement of employees taking into account their individual and psychological characteristics;
- observance of the principle of social justice in any decisions concerning the interests of the team and the individual;

<sup>48</sup> Source: grouped by authors

<sup>49</sup> Source: grouped by the authors based on the systematization of sources [3; 6; 7]

- education of employees, formation in them of a high psychological and pedagogical culture of communication, etc.

3. Stimulation of conflict is a type of activity of a management entity aimed at provoking, causing conflict. Stimulation is justified in relation to constructive conflicts. Means of stimulating conflicts can be different:

- presentation of a problematic issue for discussion at meetings, meetings, seminars, etc.;
- criticism of the situation at the meeting;
- speech with critical material in mass media, etc.

But when stimulating this or that conflict, the manager must be prepared to manage it constructively. This is a necessary condition in conflict management, its violation, as a rule, leads to sad consequences.

4. Conflict regulation is a type of activity of the management entity aimed at weakening and limiting the conflict, ensuring its development towards a solution. Stages of conflict regulation:

I stage. Recognition of the reality of the conflict by the conflicting parties.

II stage. Legitimization of the conflict, i.e. reaching an agreement between the conflicting parties on recognition and compliance with established norms and rules of conflict interaction.

III stage. Creation of relevant bodies, working groups for regulation of conflict interaction.

5. Conflict resolution is a type of management entity activity related to ending the conflict. Resolution is the final stage of conflict management. The resolution of the conflict can be complete or incomplete. The complete resolution of the conflict is achieved by eliminating the causes, subject of the conflict and conflict situations. Incomplete conflict resolution occurs when not all causes or conflict situations are eliminated. In this case, an incomplete resolution of the conflict can be a stage on the way to its complete resolution. Forms of conflict resolution:

- destruction or complete subordination of one of the parties (concession);
- coordination of interests and positions of the conflicting parties on a new basis (compromise, consensus);
- mutual reconciliation of conflicting parties (withdrawal);
- transition of struggle into cooperation in joint overcoming of contradictions (cooperation).

Solutions:

- administrative (dismissal, transfer to another job, court decision, etc.);
- pedagogical (conversation, persuasion, request, explanation, etc.).

The use of these methods of conflict management and the most common models (Table 10), which determine the types of conflicts, ways of responding to them, leadership styles that affect the interaction between team members, are useful for managers to understand the specifics of interaction, the causes of conflicts in the team and their methods elimination to achieve common goals.

It is important to remember that each of these models (table 10) of interaction and management in a team has its advantages and disadvantages, so it is important to use them taking into account the specific needs and characteristics of the team.



It is also worth stating that team management is a process that requires consideration of cultural differences, behavioral and other individual characteristics of different psychological types of team members.

The use of the presented models of conflict management can help ensure effective interaction and contribute to the success of the project.

Project managers must always be ready to solve conflicts and ensure a favorable atmosphere of trust for the effective interaction of team members at all stages of the project.

Table 10

**Models determining leadership styles, types of interaction and conflicts between team members<sup>50</sup>**

Model, author	Explanation (key provisions of the conflict-management model)
Belbin's role model (R. Meredith Belbin, 1981)	<p>Role model defines five levels of interaction or conflict resolution styles:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– ignoring: participants do not interact with each other and do not cooperate to achieve a common goal;</li> <li>– competition: participants fight with each other for resources and power, which can lead to conflict and a negative impact on team results;</li> <li>– compromise: participants agree on a compromise solution to achieve a common goal;</li> <li>– cooperation: participants work together, combining their knowledge and resources to achieve a common goal;</li> <li>– synergy: participants work together using their individual skills and knowledge to achieve results that exceed their individual capabilities.</li> </ul>
Joel Katz and Robert Cannell's «Three-Dimensional Model of Conflict» is a theoretical model that helps to understand and analyze conflicts between individuals or groups.	<p>This model describes conflicts from three main dimensions that influence the nature and development of the conflict.</p> <p>The first dimension of the model «interpersonal conflict» describes conflicts arising on the basis of personal differences, differences in values, ideas and characters between people. This dimension considers interaction and conflict between individuals as the basis of conflict.</p> <p>The second dimension «structural conflict» -reflects conflicts arising from differences in role functions, power, resources, status or other structural aspects of an organization or group. This dimension focuses on the social and structural factors that lead to conflict.</p> <p>The third dimension «information conflict» describes conflicts that arise due to differences in perception, access to information, interpretation of facts and data. This dimension draws attention to the role of communication and information exchange in the emergence and development of conflict.</p>

<sup>50</sup> Source: grouped by authors according to sources [1–8]

Model, author	Explanation (key provisions of the conflict-management model)
<p>Morton Margan's (1965) conflict model examines the interaction between individual and group goals and establishes the main types of interaction.</p> <p>The main idea of the model is that conflicts arise on the basis of inequality in the distribution of resources and can have different nature and consequences.</p>	<p>The five types of conflict include:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) distributional conflict (Distributional Conflict) occurs when different parties compete for limited resources, such as money, territory or power.</li> <li>2) value conflict (Value Conflict) when individuals or groups have different values, beliefs or worldviews that contradict each other.</li> <li>3) role conflict (Role Conflict) when the requirements and expectations associated with the roles performed by people contradict each other.</li> <li>4) power conflict (Power Conflict) when different individuals or groups compete for control, influence or power over decisions and resources.</li> <li>5) conflict of interests (Interest Conflict) occurs when individuals or groups have opposing interests or goals, which leads to disputes and rivalry.</li> </ol>
<p>The model of the Dutch psychologist Geert Hofstede (or Herd Hofstede, Geert Hofstede), in which cultural differences in different countries are studied and five cultural styles are defined</p>	<p>This model identifies five cultural styles that influence the interaction between team members:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– individualism is a culture where individuality and independence are valued more than collectivity and cooperation;</li> <li>– collectivism is a culture where collectivity and cooperation are valued more than individuality and independence;</li> <li>– power is a culture where power and hierarchy are valued more than equality and democracy;</li> <li>– equality is a culture where equality and democracy are valued more than power and hierarchy;</li> <li>– insecurity is a culture where fear of uncertainty and insecurity are valued more than adventure and risk.</li> </ul>

<sup>51</sup> Source: grouped by authors according to sources [1–8]

<b>Model, author</b>	<b>Explanation (key provisions of the conflict-management model)</b>
<p>The Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument – TKI (Thomas-Kilmann Conflict Mode Instrument) is a widely used tool for understanding and managing conflicts. This model was developed by Kenneth Thomas and Ralph Kilman and is based on their research in the field of conflicts. The model reflects five main styles of conflicts that arise between people in different situations. This model is widely used in conflict management.</p>	<p>This model defines the main conflict styles:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Collaboration (Collaborating): This style reflects a high level of cooperation and communication between the participants in the conflict. People who use this style try to find a solution that takes into account the needs and interests of all parties.</li> <li>2) Compromising: This style involves reaching a compromise and finding a solution that partially satisfies the needs of all participants in the conflict. In this approach, a certain compromise is made between opposing positions.</li> <li>3) Accommodating: This style consists in retreating from one's own positions and meeting the needs of other participants in the conflict. People who use this style usually strive to maintain harmony and relationships with other people.</li> <li>4) Competition (Competing): This style is characterized by active protection of one's own interests and positions. People who use this style are more focused on achieving their goals, regardless of the interests of other parties. They may use power, force of argument, or other forceful approaches to achieve their goals.</li> <li>5) Avoiding: This style consists in avoiding conflict. People may avoid direct confrontation, avoid the problem, or simply avoid engaging in the conflict. They may believe that maintaining harmony and avoiding tension is more important than resolving conflict.</li> </ol>

---

<sup>52</sup> Source: grouped by authors according to sources [1-8]

Model, author	Explanation (key provisions of the conflict-management model)
<p>A grid-based model of leadership by J.R. Blaket and RR Mouton (1964) is commonly used to describe and analyze leadership styles in organizations and teams. The model uses two main diagonals – the «leadership grid» and the «relationship grid» – to describe the behavior of the leader and the team.</p>	<p>This model offers an approach to leadership that is based on two main dimensions: «top-down» (systematicity) and «left-right» (cooperation or, by another definition, «humanity»). Each dimension can have a value between 1 and 9, where 1 means a low level and 9 means a high level.</p> <p>The model uses a grid, which is presented in the form of a matrix, where the «top-down» axis reflects systemicity (from above – focus on organizational structure and systems, down – focus on individual relationships), and the «left-right» axis reflects «humanity» (on the left – a low level of consideration of the interests and needs of employees, on the right – a high level of attention to the interests and needs of employees).</p> <p>Based on the combination of these two dimensions (systemicity and cooperation/»humanity») in the Management Grid model, the main characteristics of leadership are distinguished depending on the zone in the matrix:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) Team Management (9.9): High level of system and cooperation, emphasis on cooperation and development.</li> <li>2) Task Management (9.1) : Management of tasks: High level of systematicity, but low level of cooperation, emphasis on productivity and effectiveness.</li> <li>3) Indifferent management (1.1): Low level of system and cooperation, lack of confidence in management.</li> <li>4) Authority Compliance Management (1.9): Management according to authority.</li> <li>5) Middle-of-the-Road Management (5.5) : Management «in the middle of the road».</li> </ol>

<sup>53</sup> Source: grouped by authors according to sources [1–8]

<b>Model, author</b>	<b>Explanation (key provisions of the conflict-management model)</b>
«Model of leadership styles» or «Leving's model». This model was developed by Ronald Leving in 1939, and it has become widely known and used in the field of management and leadership.	This model involves five main management styles: <ul style="list-style-type: none"> <li>– authoritarian is the leader makes decisions independently and dictates his requirements to team members;</li> <li>– democratic is the leader asks for the opinion of team members and takes into account their ideas and suggestions when making decisions;</li> <li>– liberal is the manager does not interfere in the work of the team and allows the participants to make their own decisions;</li> <li>– limited is the manager limits his participation in the work of the team and does not take an active part in decision-making;</li> <li>– motivating is the leader inspires and motivates team members to achieve a common goal.</li> </ul>

So, modern models of team management, effective communication techniques and conflict management technologies allow project managers to effectively allocate tasks and control the project implementation process and coordinate interaction between participants.

These team management models can also help project managers understand which roles in the team can be useful, which types of conflicts can arise and how to solve them in a timely manner, which methods of cooperation can help achieve a common goal, etc. In addition, it is worth considering that there are usually certain communication difficulties that arise in the project team during its implementation (Table 11).

Table 11

**Possible communication difficulties in the project team  
and their overcoming<sup>55</sup>**

<b>Possible communication difficulties in the project team</b>	<b>Ways to overcome these difficulties</b>
1. Inconsistency of goals and priorities: each team member may have his own vision of what should be achieved and what steps should be taken to achieve the goal. This can lead to conflicts and delays in the project.	The best way to overcome these difficulties is to ensure a clear understanding of the project goals and priorities of each team member. Regularly discuss project progress together to make sure everyone is working in the same direction and aligned.

<sup>54</sup> Source: grouped by authors according to sources [1–8]

<sup>55</sup> Source: proposed by the authors; grouped by authors according to sources [1–8]

<b>Possible communication difficulties in the project team</b>	<b>Ways to overcome these difficulties</b>
2. Insufficient communication: If people do not communicate in a team, it can lead to misunderstandings and lack of information, which can lead to errors in the project.	It is important to ensure open and timely communication between team members. It may be worth appointing a dedicated team communicator to ensure that everyone receives the information they need and that everyone can communicate freely.
3. Differences in understanding terminology: Each team member may use different terms or understand them differently, which can lead to misunderstandings.	It is important to make sure that everyone on the team understands the terminology used in the project. If in doubt, training can be provided to ensure a common understanding of terminology.
4. Inconsistency in the level of knowledge: team members may have different levels of competence and knowledge regarding technologies, ways of working, etc.	It is important to provide training and support for team members who may need additional assistance. You can create pairs where one team member (Project Manager – the project manager, Team Lead – the team leader, or another more experienced team member, for example, with the status of Senior (Senior) helps beginners (Junior, i.e. juniors), and also in the team all help each other.

In general, to overcome these difficulties (Table 11), it is necessary for the project manager (project manager, team leader, SCRUM master) to focus on improving communication between team members, ensuring clarity and consistency, as well as on training and support.

## CONCLUSIONS

Therefore, the main factor in the successful implementation of programs and projects to improve operational efficiency is the creation of conditions for focusing the team's work on achieving the company's strategic goals, including thanks to the optimal use of resources and increased productivity of employees.

Successful implementation of programs and projects to increase operational efficiency is not possible without the factors of ensuring effective team building. The procedure of effective team building can be carried out by:

- formation of the correct composition of teams based on careful selection of suitable qualified staff in project teams with developed professional hard skills and (which is also important) soft skills;

- conducting attestation (assessment, testing) of team members to identify problems in a timely manner, timely staffing (reforming) of project teams taking into account the compatibility of team members, their potential and psychological type, role in the team, opportunities to achieve maximum efficiency when performing project tasks, etc.;

supporting effective communication and cooperation within the team, as well as providing support for the development of participants through the use of modern mentoring, conflict management and communication techniques;

defining the role and responsibility of each participant, ensuring a common understanding of the project's goals and objectives and a common focus on achieving goals, defining clear criteria for evaluating the performance of employees, KRI, competencies and skills, conditions for awarding rewards, etc.

This procedure provides the business with the opportunity to achieve high productivity of the project team by establishing clear goals, tasks, the area of responsibility of each member and the team as a whole, as well as ensuring other factors of the successful work of the project team.

Thus, the implementation of programs and projects to increase operational efficiency, considering the features and techniques of successful team building based on the «performance management» technology, contributes to the achievement of the strategic goals of the organization, optimal use of all company resources.

## **SUMMARY**

To sum up all aspects, the key determinant for the successful execution of programs and projects aimed at increasing operational efficiency is the creation of an environment that directs the team's efforts towards the attainment of the company's strategic goals. It is achieved through the judicious allocation of resources and the heightened productivity of employees. Effective team formation emerges as a critical factor without which the realization of such programs and projects remains elusive. The process of effective team building encompasses several main steps:

- 1) Careful selection involves carefully assembling teams through the rigorous selection of suitably qualified individuals possessing both proficient technical skills and vital soft skills.

- 2) Regular assessments, tests, and evaluation of team members facilitate the early identification of issues allowing for timely adjustments to team composition. It includes considering compatibility, potential, psychological disposition and assigned roles within the team.

- 3) Creating an environment of open communication and seamless collaboration is critical. Employing modern mentoring techniques, conflict resolution strategies and advanced communication methods which play an important role in this regard.

- 4) Defining the roles and responsibilities of each team member, establishing a shared understanding of project objectives, and aligning efforts towards common goals are essential. This requires establishing transparent evaluation criteria that cover employee performance, Key Performance Indicators (KRI), competencies, skills and compensation terms.

By following this procedural framework, businesses can significantly improve the productivity of project teams. It involves setting clear goals, delineating tasks and responsibilities for each team member and addressing other vital factors contribute to the team's overall success. Therefore, the

implementation of programs and projects aimed at augmenting operational efficiency, guided by the principles of effective team building rooted in «performance management» technology, actively contributes to the realization of organizational strategic objectives and the optimal utilization of all available company resources.

### **Bibliography**

1. Belbin R. M. Management Teams: Why They Succeed or Fail (3nd ed.). London. Routledge. 2010. p. 204. URL: <https://doi.org/10.4324/9780080963594>.

2. Hackman J. R. Leading Teams: Setting the Stage for Great Performances. Harvard Business School Press. Boston: Harvard Business School Press. 2002. 336 p. URL: <https://scholar.harvard.edu/rhackman/publications/leading-teams-setting-stage-great-performances>.

3. Данченко О.Б., Бедрій Д.І., Семко І.Б. Управління конфліктами наукового проєкту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проєктами. 2019. № 2. С. 28 – 35. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntux\\_ctr\\_2019\\_2\\_7](http://nbuv.gov.ua/UJRN/vntux_ctr_2019_2_7)

4. Katzenbach J. R., & Smith D. K. The Wisdom of Teams: Creating the High-Performance Organization. HarperCollins Publishers. 1993. p. 291

5. Kozlowski, S. W. J., & Ilgen, D. R. Enhancing the effectiveness of work groups and teams. *Psychological Science in the Public Interest*. 2018. №19(3). PP.77-124.

6. Осичка О.В., Чернега О.М. Особливості управління конфліктами в проєктній команді. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2017. №5. С. 152 – 171. URL: <http://n-visnik.oneu.edu.ua/collections/2017/247/page.php?id=abstract/ukr/152-171>

7. Групова динаміка та комунікації (тренінг): курс лекцій. / укл.: Ющишина Л.О.; Луцьк: Волинський національний університет імені Лесі Українки. 2022. 170 с.

8. Tuckman B. W. Developmental sequence in small groups. *Psychological Bulletin*, 1965. № 63(6), PP.384-399.

9. Гавриш О.А., Довгань Л.Є., Крейдич І.М., Семенченко Н.В. Технології управління персоналом: монографія. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 528 с.

10. Управлінські команди: технології підготовки (соціально-психологічний аспект та витоки): монографія / В. В. Третяченко, В. М. Гончаров, О. А. Коломійцев; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. Луганськ : Світлиця, 2005. 255 с.

11. Лесечко М.Д., Чемерис А.О., Рудніцька Р.М. Психологія прийняття управлінських рішень і створення ефективних команд. Львів Регіональний Інститут публічного адміністрування української академії держуправління при Президентові України. Львів. 2003. 84 с.



12. Технології управління людськими ресурсами : навч. посібник для здобувч. ступеня магістра за ОПП «Менеджмент і бізнес адміністрування» / укл.: Л. Є. Довгань, Л. Л. Ведута, Г.А. Мохонько; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 512 с.
13. Armstrong Ronald V. (2021) Overcoming Objections to Team-Based Organization with Self-Managed Teams: materials of the website «Rvarmstrong». URL: <http://www.rvarmstrong.com..>
14. Katzenbach Jon R., Smith Douglas K. The Wisdom of Teams: Creating the High-Perfomance Organization. NY: NWQ. 1999. 320 p.
15. Belbin Meredith R. Management Teams: Why They Succeed or Fail. – Lnd: 1994. 312 p. URL: <https://www.belbin.com/about/dr-meredith-belbin>.
16. Kevin Haas. Listening: The Secret Weapon of Emotional Intelligence: materials of the website «Stopatnothing». 2018. URL: <https://www.stopatnothing.com/listening-the-secret-weapon/>.
17. Marcelle Waldman. Emotional Intelligence Explained and why it's important for children and adults: materials of the blogs «Myfeellinks». 2021. URL: <https://myfeellinks.com/blogs/news/emotional-intelligence-explained-and-why-its-important-for-children-and-adults>.
18. Linh Tran. Emotional Intelligence is Key for a Project Manager: materials of the website «INLOOX». 2015. URL: <https://www.inloox.com/company/blog/articles/emotional-intelligence-is-key-for-a-project-manager/>.
19. William Marston model DISC: materials of the website «Winpartners.Lv». URL: <https://winpartners.lv/en/disc-model-for-managers/>; <https://factum-info.net/uk/tests/1144-test-disc-opredelite-vash-povedencheskij-tip-lichnosti>.
20. Конспект лекцій з дисципліни «Креативний менеджмент» для підготовки здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня зі спеціальності 073 «Менеджмент» за освітньо – професійною програмою «Менеджмент». Укл.: д.е.н., проф. Олена Плахотнік. Кам'янське. ДДТУ. 2022. 67 с., С.14.
21. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) — Seventh Edition and The Standard for Project Management. Project Management Institute, Inc., 2021. P. 370. URL: Project Management Body of Knowledge.
22. Daniel Goleman. Emotional Intelligence: Why It May Matter More Than IQ. Emotional Intelligence: materials of the website «WIND4CHANGE». 2021. URL: <https://wind4change.com/emotional-intelligence-daniel-goleman-work-self-mastery/>.
23. Hugo Minziberger. PAEI Model – Producer, Administrator, Entrepreneur & Integrator – A Powerful Model to create New Teams: materials of the website «ARE.NA». 2022. URL: <https://www.are.na/block/13396366>; [https://d2w9rnfcy7mm78.cloudfront.net/13396366/original\\_1620700e4597fda374fd3bb47111de61.png?1633112696?bc=0](https://d2w9rnfcy7mm78.cloudfront.net/13396366/original_1620700e4597fda374fd3bb47111de61.png?1633112696?bc=0).

24. Що таке високий потенціал співробітника?: за матеріалами розділу «Управління персоналом» вебсайту Компанії «SHL». URL: <https://shl.com.ua/reshenija-dlja-hr/ocenka/hipo> .

25. Model of coaching and mentoring OSCAR. Coaching-models: materials of the website «Tciurbanhealth». 2023. URL: <https://tciurbanhealth.org/courses/coaching-essentials/lessons/different-coaching-models/>.

26. Gaurav Mamgain. Frederick Herzberg's two-factor model of the study of hygienic and motivational factors Herzberg's Two Factor Theory of Motivation (Motivator-Hygiene Factors) : materials of the website «Edukedar». 2023. URL: <https://edukedar.com/herzbergs-two-factor-theory/>.

27. Norman Murray. 9 Levers for Team Leaders to creat a culture of inspired colleagues: materials of the website «LinkedIn». 2023. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/9-levers-team-leaders-creat-culture-inspired-norman-murray> .

28. David McClelland's model: materials of the website «Lathateacher». 2015. URL: <https://lathateacher.wordpress.com/2015/10/25/90/> / (accessed 14.03.2023).

29. McGregor. Theory X Y Model: materials of the website «Mercureaace». 2013. URL: [https://mercureaace2013.wordpress.com/2013/07/01/volunteer\\_3\\_di\\_motivationincentives-behavioral-science-part-ii/](https://mercureaace2013.wordpress.com/2013/07/01/volunteer_3_di_motivationincentives-behavioral-science-part-ii/).

#### **Information about the authors:**

**Rovenska Viktoriia Viacheslavivna,**

Candidate of Economic Sciences,

Associate Professor of the Department of Digital technologies and design and analytical solutions

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Smyrnova Iryna Ivanivna,**

Candidate of Economic Sciences,

Associate Professor of the Department of Digital technologies and design and analytical solutions

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

**Latysheva Olena Volodymyrivna,**

Candidate of Economic Sciences,

Associate Professor of the Department of Digital technologies and design and analytical solutions

LLC “TECHNICAL UNIVERSITY “METINVEST POLYTECHNIC”

80, Pivdenne shose str., Zaporizhzhia, 69008, Ukraine

## **THEORETICAL FOUNDATIONS OF THE DEVELOPMENT OF THE IRON ORE INDUSTRY IN UKRAINE**

**Romanenko A. O.**

### **INTRODUCTION**

The mining industry take a significant role in the development of Ukraine's economy. Ukraine achieved the status of a leading global producer of iron ore raw materials by February 22, 2022. The country demonstrated a high level of iron ore production, despite challenges and technical complexities.

Ukraine possesses a significant raw iron ore base, including magnetite and oxidized quartzites, which play a crucial role in the mining and metallurgical industry. Technogenic deposits, such as tailing ponds, also contain various materials for further use and enrichment.

This raw material base provides Ukraine with substantial potential for the development of the mining industry and related sectors. However, it is essential to utilize it efficiently and address environmental and technological challenges. Among the key resources, natural-rich iron ores with high metal content, magnetite, and oxidized quartzites stand out, which are utilized in the mining and metallurgical industry.

Technogenic deposits, such as tailing ponds, are a vital part of the raw material base. They contain essential components for further utilization and enrichment. However, it is necessary to maintain a balance between the extraction of valuable minerals and the protection of ecosystems for the sustainable development of the mining industry.

Scientific research and technological advancements are constantly improving, opening up prospects for the further development of iron ore extraction and processing. Investments in the raw material sector and technological advancement will contribute to the successful future of Ukraine's mining and extraction complex.

According to the state geological and subsoil service of Ukraine's report for 2019, the total explored balance reserves of iron ores in the country amount to approximately 20.9 billion tons. this quantity indicates a robust potential in the iron ore base, which is crucial for the development of the mining and metallurgical industry<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Офіційний сайт Державної служби геології та надр України: <https://www.geo.gov.ua/?s=%D0%91%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%96+%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%B8+%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D1%97+%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8>, (Accessed 06 October 2023).

The mentioned 20.9 billion tons are categorized differently. Approximately 11 billion tons constitute reserves that are already in active enterprises. This availability of readily exploitable reserves is a valuable resource for meeting iron ore material needs and ensures the stability of the mining and extraction industry. Based on the average iron ore production rate of approximately 170 million tons per year, it is estimated that the available reserves will last for the next 65 years. Additionally, according to the state geological and subsoil service of Ukraine (DNVP "Geoinform Ukraine") data as of the beginning of 2021, the balance reserves of iron ores amounted to 18,065.04 million tons, which represents a significant quantity of iron ore resources with substantial potential for further exploration and extraction<sup>2</sup>.

For the sustainable development of Ukraine's mining industry and the maximization of benefits from iron ore resources, it is necessary to actively explore new deposits and modernize extraction mechanisms.

This article analyzes the state of Ukraine's mining and extraction complex, focusing on the Kryvyi Rih iron ore basin. It examines factors influencing the industry's productivity and cost-effectiveness, including government support, legislation, technological modernization, and environmental requirements. The aim is to identify development priorities and propose measures to improve the industry's situation and enhance the competitiveness of Ukraine's mining and extraction complex, taking into account contemporary trends and sustainable development requirements.

## 1. Methods

This section outlines the primary methods and approaches used to optimize the production capacities of mining and extraction enterprises and ensure the sustainable development of the industry.

### 2.1. Utilization of Research and Analysis.

Thorough research and analysis of geological, mining, and technical parameters of deposits are essential for the efficient use of mineral resources. They help determine the structure and properties of resources and develop optimal approaches to their extraction and processing.

### 2.2. Innovation and Technology.

The use of modern technologies and innovative approaches is crucial for optimizing mining processes. New technologies<sup>3</sup>, automated equipment, and

---

<sup>2</sup> Портал даних видобувної галузі України: <https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/rudi-zalaza/>, (Accessed 06 October 2023).

<sup>3</sup> Kateryna Babii, Mykhailo Chetveryk, Volodymyr Perehudov, Kostiantyn Kovalov, Ruslan Kiriia, Viacheslav Pshenychnyi (2022) Features of using equipment for in-pit crushing and conveying technology on the open pit walls with complex structure Mining of Mineral Deposits, Volume 16 (2022), Issue 4, 96-102 <https://doi.org/10.33271/mining16.04.096>, (Accessed 06 October 2023)

digital systems enhance productivity and efficiency in extraction, reduce environmental impact, and improve safety<sup>4</sup>.

### 2.3. Environmental and Social Responsibility.

Preserving the environment and considering social aspects are key elements of optimizing mining processes. Developing and implementing environmentally friendly technologies, minimizing emissions and environmental impact, and ensuring the safety and well-being of employees are industry priorities.

### 2.4. Rational Resource Utilization and Strategic Planning.

Sustainable industry development involves the efficient use of available mineral resources and careful strategic planning for their extraction. Research into reserves and the development of growth strategies help ensure the industry's long-term viability and balance extraction with sectoral needs.

### 2.5. Investments and Partnerships.

Investments in the mining industry drive the adoption of new technologies and methods. Partnerships with scientific institutions, businesses, and international organizations facilitate the exchange of expertise and access to modern resources and knowledge.

### 2.6. Organizational and Technical Measures.

The implementation of a wide range of organizational and technical measures, supported by the government, is a key factor in successfully managing the mining industry. This approach has allowed for the effective increase in iron ore production and the realization of the country's export potential, even in the face of global financial crises and growing competition.

### 2.7. Sustainable Development and Exports.

The achieved results enable Ukraine to maintain a stable export potential despite global financial crises and competition. The mining industry in Ukraine remains resilient and capable of holding its positions in the global market.

### 2.8. Challenges of Modern Mining.

The past two decades have been challenging for the mining industry, driven by both objective and subjective factors. This period has not led to significant industry improvements due to natural limitations and management issues.

### 2.9. Challenges and Prospects.

The industry faces numerous challenges, such as limited technical development, high costs, and a lack of modernization. These aspects hinder industry growth and erode competitiveness in the international market.

---

<sup>4</sup> O. Kovrov, K. Babiy, M. Rakishev, A. Kuttybayev (2016) Influence of watering filled-up rock massif on geomechanical stability of the cyclic and progressive technology line Mining of Mineral Deposits Journal homepage Volume 10, Issue 2, pp. 55-63. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.055>, (Accessed 06 October 2023)

These methods and approaches form a crucial foundation for achieving sustainable development in the mining industry and ensuring the efficient utilization of iron ore resources for the needs of the economy and society.

This section emphasizes the importance and challenges of optimizing mining processes, implementing effective technologies, and strategic management to ensure the stable and sustainable development of the iron ore extraction industry.

## **2. Theoretical part**

### **3.1. Improvement of Strategic Development and Innovative Approaches.**

Improving strategic planning and fostering innovation is a crucial task for the state and industry institutions. This will allow attracting investments and promoting the implementation of modern technologies in Ukraine's mining industry. Collaboration with international partners and scientific research can enhance the conditions for the development of the iron ore production sector.

The history of Ukraine's mining industry demonstrates that despite achieving records in iron ore production, it has been challenging to fully restore past performance levels. For example, in 1978, an impressive production volume of 126.4 million tons was reached, but subsequent years brought challenges and obstacles that limited the ability to replicate this success.

Even in 1990, when iron ore production amounted to 104.9 million tons, the industry could not fully restore previous figures. Various factors such as economic crises, changes in global market conditions, productivity losses at old deposits, and a lack of investment altered the prospects for the industry's development.

Active review of strategies and the identification of new development directions, coupled with initiatives for modernization and increased competitiveness, can contribute to the rapid growth of this vital sector of Ukraine's economy and secure its position in the international market.

### **3.2. Export and Import of Iron Ore: Challenges and Prospects.**

In 2021, the industry supplied metallurgical enterprises with iron ore raw materials according to their production needs, and there was no import of iron ore raw materials, indicating the self-sufficiency of the industry<sup>5</sup>.

However, it's important to note that iron ore exports decreased by 4.2% in 2021 compared to the previous year, amounting to 44.5 million tons. Still, the monetary value increased by 62.8% to \$6.9 billion<sup>6</sup>. Despite exports

---

<sup>5</sup> Офіційний сайт Об'єднання підприємств «Металургпром»: <https://www.ukrmetprom.org/pidsumki-roboti-gmk-ukraini-za-12-misyaci/>, (Accessed 06 October 2023).

<sup>6</sup> Офіційний сайт GMK Center: <https://gmk.center/ua/news/ukrainskij-gmk-u-2022-roci-eksportuvav-24-mln-t-zaluznoi-> (Accessed 06 October 2023).

accounting for half of the production, the ranking of the product remained low in the global market, making the industry vulnerable to market fluctuations.

This vulnerability is evident through the necessity of importing iron ore raw materials into Ukraine for several years, with imports exceeding 7 million tons. This indicates internal issues within the industry and a lack of domestic resources to produce products that meet global standards.

To enhance the competitiveness and resilience of the mining sector in Ukraine, it is essential to increase investments, improve technologies, enhance product quality, and develop the domestic market. This will help reduce dependence on external factors and increase the industry's resilience to changes in the global market, ultimately promoting the development of the Ukrainian mining sector in the future.

### 3.3. Resource Availability and Geological Conditions: Challenges and Importance.

The stability of the mining industry depends on the availability of sufficient iron ore reserves and the consideration of geological conditions during extraction. Resource availability allows the industry to plan production and ensures high product quality. Geological conditions affect the organization of mining but can create challenges, particularly in terms of safety and costs.

Preserving and replenishing ore reserves are crucial tasks for the industry's stability. Continuous mining leads to the depletion of deposits, so actively searching for new sources is necessary. Reclamation of mining sites, or the restoration of the natural environment after mining, helps preserve the ecological balance and provides opportunities for sustainable and environmentally friendly mining production.

### 3.4. New Deposits and Challenges of Underground Mining.

The mining industry in Ukraine continually seeks new deposits and implements advanced technologies. This is necessary to support production but presents challenges such as high costs and compliance with environmental standards. Lowering the level of mining operations at depth is a key aspect, as it affects extraction timelines and safety.

An important aspect is the annual decrease in the level of mining operations in open-pit mining, which is approximately 7-9 meters, while in underground operations, this figure increases to 12-16 meters.

Reducing the level of mining operations is essential for ensuring stable extraction and the restoration of natural resources. However, this requires specialized technologies and resources.

The depth of iron ore reserve exploitation through underground methods has indeed reached significant values, namely 1200-1400 meters, compared to the depth of open-pit mining, which is about 350-400 meters. These values

indicate the maximum depth to which iron ore deposits are developed depending on the extraction method.

### 3.5. Challenges of Deep Mining and Efficient Resource Management.

As mining operations go deeper, mining companies face the challenge of precise and efficient planning. Deep mining also leads to increased costs due to the need for powerful equipment and safety measures.

This situation poses a profitability challenge for companies. Planning and optimizing extraction processes at great depths are key tasks for sustainable development and the rational use of resources.

In some mining and beneficiation complexes, the ratio of iron ore overburden volume to production ranges from 0.3 to 1.5 m<sup>3</sup> per 1 ton of extracted ore. This affects environmental considerations and demands attention to ecology.

During financial crises, companies reduce the volume of overburden removal, which can limit their development and stability. The availability of ready-to-mine ore reserves for companies is a critical factor for sustainable production and efficient management. Balancing stability and financial performance is crucial for the industry's future development.

### 3.6. Challenges of Reduced Stripping Volumes and Water Resource Management.

From 2014 to 2021, mining companies witnessed a decrease in activity and increased competition, which required restraining the rise in production costs, particularly through reduced stripping volumes.

The overburden-to-ore ratio was 2.1% in 2014, but it increased to 20.8% in 2015, underscoring the challenges in providing the necessary stripping volumes for stable production.

Reduced stripping adversely affects the resource base and the industry's prospects, necessitating strategic measures to preserve stability and efficiency.

The reduction in mining depth is accompanied by water pumping from deep horizons. This increases geological risks, requiring significant expenditures to ensure safe working conditions and rock stability.

### 3.7. The Importance of Implementing Advanced Technologies and Reconstruction for the Mining Industry.

Ukrainian mining enterprises face significant challenges, such as increasing depths of ore deposit exploitation and dewatering of deep mines. This prompts them to adopt advanced technologies and undertake facility reconstruction.

Modernization and upgrading of enterprises enhance mining efficiency, reduce costs, and improve product quality. This provides enterprises with a competitive edge and supports their stability in the market.

Flexibility in utilizing cutting-edge technologies helps enterprises adapt to changing conditions and market demands. Increasing production capacity is



crucial for the development of the industry and the Ukrainian economy. Support for the reconstruction and modernization of production is essential for ensuring the sustainable development of mining in the country.

### **3. Results**

#### **4.1. Reasons for the Decrease in Iron Ore Production and Product Deliveries.**

The decrease in iron ore production and product deliveries in Ukraine can be attributed to the following key reasons:

1. Market oversaturation: iron ore production exceeds demand, leading to stockpiling. Enterprises limit production and deliveries to avoid oversaturating the market.

2. Low competitiveness: domestic products are not always competitive compared to global manufacturers. Enterprises must reduce costs and improve quality to attract customers.

3. Decreasing global prices: Excessive supply of iron ore products leads to falling prices on the world market, affecting profitability and the ability of enterprises to increase production.

4. Political instability and conflicts: political conflicts and military actions limit the supply and transportation of iron ore, negatively impacting the industry.

These factors collectively affect Ukraine's mining industry, creating challenging conditions for its development and stable operation. Implementing effective strategies and measures can help overcome these challenges and ensure the industry's stable development.

#### **4.2. Challenges and issues in Ukraine's mining industry.**

While possessing vast potential in iron ore resources and the capability for extraction and processing, Ukraine's mining industry faces several critical problems requiring immediate resolution to ensure stable and efficient development:

1. Low ore quality: the ore exhibits low quality and necessitates additional expenses for enrichment before further use.

2. Increased depth of mining: continuous deepening of operations complicates extraction and raises costs.

3. High energy consumption: the industry demands significant energy resources, which can impact profitability.

4. Equipment renewal: constant replacement and upgrading of production equipment require investments.

5. Environmental concerns: mining operations can harm the environment.

6. Large volumes of waste: increased extraction leads to the accumulation of substantial waste volumes.

7. Rising transportation costs: deeper development increases transportation expenses for raw materials.

8. High costs of technological equipment and energy: rising equipment and energy resource prices create financial pressure.

9. Low innovation level: the absence of innovative solutions limits development opportunities and process optimization.

Addressing these issues is vital to support the effective growth of Ukraine's mining industry and sustain its competitiveness on the global market. Process optimization, innovative solutions, and a balanced approach to addressing these problems can contribute to the industry's sustainable development and minimize negative impacts.

4.3. Challenges of national significance and their impact on Ukraine's mining sector.

The constant negative pressure of national significance also significantly affects Ukraine's mining sector, putting its effective development at risk. Among the main problems arising from this are the following:

1. Lack of strategy and support: insufficient management and the absence of strategic plans complicate the industry's development.

2. Rising fees and tariffs: increased costs for resource use and product transportation can burden the sector.

3. Inadequate regulatory framework: the absence or obsolescence of laws and regulations complicates sector management.

4. Unfavorable investment climate: lack of investment slows down modernization and sector development.

5. Low scientific support: the absence of a proper scientific base hinders innovation and the development of new technologies.

6. Absence of domestic machinery production: dependence on imported machinery and equipment complicates sector development.

7. Global financial crises: changes in global markets can affect commodity prices and lead to economic difficulties in the sector.

Addressing these issues requires a comprehensive approach and active participation from the state, businesses, and the scientific community to create favorable conditions for the sustainable and efficient development of Ukraine's mining sector.

4.4. Adaptation and innovation: key aspects of the development of the mining sector.

Adaptation and innovation are key aspects of the development of Ukraine's mining sector, especially in the face of market uncertainty and competition. The main aspects of this process include:

1. Strategic review: companies must continually analyze their strategy, taking into account changes in the market and the economy. this may involve

shifting to new types of products, entering new markets, or expanding the geographic scope of sales.

2. Technological innovation: it is crucial to implement modern technologies to increase productivity and reduce costs. this may include automation, using data for decision-making, and adopting more efficient methods of ore extraction and processing.

3. Exploring new markets: decreased domestic demand may require exploring new markets for mining products, including export opportunities.

4. Balance and efficiency: companies should strive to balance their expenses and income, reduce losses and costs to maintain stability and profitability.

5. Promoting innovation: allocating financial resources to research and development of new technologies and approaches can support the innovative development of the industry.

6. Collaboration with research institutions: partnering with research institutions and universities can facilitate the development and implementation of new technologies and solutions.

Adaptation and innovation will help the sector maintain competitiveness and ensure sustainable growth, even in the face of challenges and uncertainty.

4.5. Technological upgrade and investments: key aspects of modernizing the mining sector.

Modernization and the adoption of new technologies will make this industry more efficient, competitive, and resilient to future challenges. Here are key points:

1. Investment in research and development: exploring new technologies and innovations can be a significant step toward modernization. This includes funding scientific research and development efforts aimed at improving mining and ore processing processes.

2. Support for initiatives: governmental and legislative support for initiatives aimed at modernizing the mining sector can incentivize investors and companies to implement new technologies.

3. Improved efficiency: the application of modern technologies can increase productivity and reduce production costs. Efficiency is a crucial factor in ensuring competitiveness.

4. Environmental sustainability: new technologies can help reduce the negative impact on the environment, which is an essential consideration in today's market and regulatory requirements.

5. Training and workforce development: developing and training personnel to work with new technologies is also a crucial component of successful modernization.

In general, it is in Ukraine's best interest, both as a nation and for the mining industry as a whole, to actively pursue technological upgrades and

investments to ensure sustainable development and competitiveness in the global market.

4.6. Prospects and priorities for the development of Ukraine's mining industry.

To ensure sustainable and effective development of Ukraine's mining industry, it is essential to actively address the challenges that put it at a crossroads. This can be achieved through investments in new technologies, scientific research, equipment modernization, and enhancing competitiveness in the global market. Such measures can secure steady and efficient industry growth, preserve its significance for the country's economy, and improve the quality of life for miners.

The priority directions for sustainable and effective long-term development of Ukraine's mining complex, including addressing issues in the Kryvyi Rih iron ore basin, include:

1. Product diversification: in addition to ore enrichment, consider expanding the range of products to include other valuable minerals or higher-value metal production. This can reduce the industry's dependence on fluctuations in the iron ore market.

2. International cooperation: explore opportunities for collaboration with international companies that have experience in modern mining technologies. This can accelerate the adoption of new practices and technologies.

3. Human capital: invest in the training and development of miners and engineers to equip them with the skills required to operate modern equipment and technologies.

4. Safety standards: ensure the highest safety standards for miners and mining processes to prevent accidents and incidents.

5. Green mining initiative: consider launching a green mining initiative that promotes environmentally friendly mining and ore processing practices.

The successful development of the mining industry will have significant implications for Ukraine's economy and social stability. Implementing these measures will help overcome challenges and create conditions for the sustainable and efficient growth of the mining industry in Ukraine, enhancing its competitiveness in the global market.

## **CONCLUSIONS**

The implementation of state support for Ukraine's mining industry to comprehensively address its challenges can be a key factor in ensuring its sustainable and effective development. Introducing the following measures will contribute to resolving pressing issues:

1. State support - a crucial stimulus for the sustainable development of Ukraine's mining sector.

2. The research program for the Kryvyi Rih iron ore basin - a guarantee of safety and stability in extraction.

3. A prospective development strategy - necessary for effective reforms and the industry's sustained growth.

4. Strengthening state regulation - contributes to the fair distribution of resources and income.

5. Joint projects and technical adaptation - enhance resource utilization efficiency.

6. Innovation support - the key to the industry's competitiveness in the global market.

7. Creating a favorable investment climate - ensures the stability and growth of the country's export potential.

These steps share a common goal - the comprehensive resolution of issues in the mining industry, improvement of the resource base, and increased efficiency of resource utilization. It is crucial for government bodies, businesses, and research institutions to collectively direct their efforts towards implementing these measures to achieve the sustainable development of the industry and contribute to the prosperity of the country as a whole.

## **SUMMARY**

The article examines the theoretical foundations of the development of the iron ore complex in Ukraine, with a focus on the Kryvyi Rih iron ore basin. Key issues are identified, such as outdated equipment, insufficient investment, and environmental and social aspects. The author proposes solutions to these problems, including technological improvement, optimization of deposit development, the advancement of scientific research, and attracting investments. The importance of government support for the sustainable development of the industry is discussed, and specific measures are suggested, such as the development of development strategies and programs, ensuring transparent resource allocation, and providing incentives for innovative enterprises. The critical importance of the development of the mining industry for the country's economy and ecology is emphasized. As a result of the research, specific steps are proposed to ensure the sustainable and efficient development of the industry and enhance competitiveness in the international market.

## **Bibliography**

1. Офіційний сайт Державної служби геології та надр України:  
<https://www.geo.gov.ua/?s=%D0%91%D0%B0%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BE%D0%B2%D1%96+%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%81%D0%B8+%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0>

%B7%D0%BD%D0%BE%D1%97+%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%B8  
, (Accessed 06 October 2023).

2. Портал даних видобувної галузі України:  
<https://www.eiti.gov.ua/resursi-rozvidka-ta-vidobuvannya/rudi-zaliza/>,  
(Accessed 06 October 2023).

3. Kateryna Babii, Mykhailo Chetveryk, Volodymyr Perehudov, Kostiantyn Kovalov, Ruslan Kiriia, Viacheslav Pshenychnyi (2022) Features of using equipment for in-pit crushing and conveying technology on the open pit walls with complex structure Mining of Mineral Deposits, Volume 16 (2022), Issue 4, 96-102 <https://doi.org/10.33271/mining16.04.096>, (Accessed 06 October 2023).

4. O. Kovrov, K. Babiy, M. Rakishev, A. Kuttybayev (2016) Influence of watering filled-up rock massif on geomechanical stability of the cyclic and progressive technology line Mining of Mineral Deposits Journal homepage Volume 10, Issue 2, pp. 55-63. <https://doi.org/10.15407/mining10.02.055>, (Accessed 06 October 2023).

5. Офіційний сайт Об'єднання підприємств «Металургпром»:  
<https://www.ukrmetprom.org/pidsumki-roboti-gmk-ukraini-za-12-misyaci/>,  
(Accessed 06 October 2023).

6. Офіційний сайт GMK Center: <https://gmk.center/ua/news/ukrainskij-gmk-u-2022-roci-eksportuvav-24-mln-t-zaliznoi-rudi/#:~:text=%D0%AF%D0%BA%20%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D1%96%D0%B4%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D1%8F%D0%B2%20GMK%20Center%2C%20%D0%B7%D0%B0,%E2%80%93%20%D0%B4%D0%BE%20%24%2C%20%D0%BC%D0%BB%D1%80%D0%B4>,  
(Accessed 06 October 2023).

#### **Information about the author:**

**Romanenko Andrii Oleksandrovych,**

Candidate of Technical Sciences,

Mine Surveyor Engineer of the Rock Movement Monitoring

Private joint-stock company Central Mining and Concentration Plant

Kryvyi Rih, Dnipropetrovsk region, 50066, Ukraine

*The project was implemented with the support of*



**The Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation** is a non-governmental organization, which was established in 2010 with a view to ensuring the development of international science and education in Ukraine by organizing different scientific events for Ukrainian academic community.

**The priority guidelines of the Centre for Ukrainian and European Scientific Cooperation**

**1. International scientific events in the EU**

Assistance to Ukrainian scientists in participating in international scientific events that take place within the territory of the EU countries, in particular, participation in academic conferences and internships, elaboration of collective monographs.

**2. Scientific analytical research**

Implementation of scientific analytical research aimed at studying best practices of higher education establishments, research institutions, and subjects of public administration in the sphere of education and science of the EU countries towards the organization of educational process and scientific activities, as well as the state certification of academic staff.

**3. International institutions study visits**

The organisation of institutional visits for domestic students, postgraduates, young lecturers and scientists to international and European institutes, government authorities of the European Union countries.

**4. International scientific events in Ukraine with the involvement of EU speakers**

The organisation of academic conferences, trainings, workshops, and round tables in picturesque Ukrainian cities for domestic scholars with the involvement of leading scholars, coaches, government leaders of domestic and neighbouring EU countries as main speakers.

**Contacts:**

Head Office of the Center for Ukrainian and European Scientific Cooperation:  
88000, Uzhhorod, 25, Mytraka str.  
+38 (099) 733 42 54  
info@cuesc.org.ua

**[www.cuesc.org.ua](http://www.cuesc.org.ua)**

Izdevniecība “Baltija Publishing”  
Valdeķu iela 62 – 156, Rīga, LV-1058  
E-mail: office@baltijapublishing.lv

---

Iespiests tipogrāfijā SIA “Izdevniecība “Baltija Publishing”  
Parakstīts iespiešanai: 2023. gada 30. novembris  
Tirāža 150 eks.