

ISSN 2500-0632 (ON-LINE)

TOM 5, №1
VOL. 5, №1
2020



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

(RUSSIA)

GORNYE NAUKI I TEKHNOLOGII
ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY MISIS

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

ОБОГАЩЕНИЕ, ПЕРЕРАБОТКА МИНЕРАЛЬНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ

Improvement of technology and jar mills for preparation of coal-water fuel from waste coal... 4
 Murko V. I., Volkov M. A., Grinyuk D. P., Baranova M. P., Holboev G. O.

**Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу
ультразвуком** 12
 Кононов А. В., Дуйсебаев Б. О.

Selective extraction of cobalt and copper from Chilean mine water by ion-exchange resin..... 25
 Abeywickrama J., Hoth N., Ussath M., Drebenstedt C.

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

**Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических
явлений для условий рудных месторождений**..... 30
 Ловчиков А. В.

**Результаты исследований волнового характера опорного давления целиков и краевых
частей угольных пластов**..... 39
 Лис С. Н.

**Исследование процесса формирования зон опорного давления в системе «парные
штреки»**..... 49
 Титов Н. В., Иванов С. И.

ПОДГОТОВКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

**Анализ эффективности реализации компетентностного подхода в программе
опережающего обучения горнодобывающей компании**..... 56
 Климов И. Ю.

CONTENTS

ORIGINAL PAPERS

BENEFICIATION. PROCESSING OF NATURAL AND TECHNOGENIC MINERALS

- Improvement of technology and jar mills for preparation of coal-water fuel from waste coal...** 4
 V. I. Murko, M. A. Volkov, D. P. Grinyuk, M. P. Baranova, G. O. Holboev
- Ultrasonic intensification of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin..** 12
 A. V. Kononov, B. O. Duisebayev
- Selective extraction of cobalt and copper from Chilean mine water by ion-exchange resin.....** 25
 J. Abeywickrama, N. Hoth, M. Ussath, C. Drebenstedt

ROCK CHARACTERISTICS. GEOTECHNIC SURVEY AND GEOPHYSICS

- A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits.....** 30
 A. V. Lovchikov
- Findings of studies on wave character of pillar support pressure and edge parts of coal seams..** 39
 S. N. Lis
- Study of abutment pressure zone formation in the system of "paired drifts".....** 49
 N. V. Titov, S. I. Ivanov

PROFESSIONAL PERSONNEL TRAINING

- Analysis of soft skills-based approach effectiveness in advanced training program for mining company.....** 56
 I. Yu. Klimov

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-4-11

**Improvement of Technology and Jar Mills
for Preparation of Coal-Water Fuel from Waste Coal**V. I. Murko¹, M. A. Volkov¹, D. P. Grinyuk¹, M. P. Baranova^{2,3}, G. O. Holboev⁴¹LLC SibNIIUgleobogoshcheniya, Prokopyevsk, Russia²Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia³Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia⁴Navoi Mining & Metallurgical Combinat, Navoi, Republic of Uzbekistan

Abstract: The process and equipment have been developed for preparation and burning (at small and medium capacity boiler plants) of slurry coal-water fuel, produced from finely dispersed coal preparation waste (filter cakes) from coal preparation plants of Komsomolets Mine and Named after S. M. Kirov Mine. It was shown that, based on these wastes, it is possible to produce slurry coal-water fuel with solids content of 56–60 %, the required structural and rheological characteristics, and lower heating value of up to 13 MJ/kg. Based on the research findings, detail design was developed for creation of the pilot process complex for processing of waste coal to produce slurry coal-water fuel for burning at boiler plant. Assessment of using the whole volume of the SUEK Kuzbass coal preparation plants waste coal at the nearby Belovskaya SDPP was performed, which showed high economic and environmental efficiency of the proposed project.

Keywords: waste coal, slurry coal, coal-water fuel, jar mill, vibration testing machine.

For citation: Murko V. I., Volkov M. A., Grinyuk D. P., Baranova M. P., Holboev G. O. Improvement of technology and jar mills for preparation of coal-water fuel from waste coal. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):4-11. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-4-11.

Introduction

In recent years, industrial application of so-called jar mills for fine grinding has begun. The mills allow both dry and wet grinding to high degree of material dispersity. High-frequency jars and diverse nature of the impacts of grinding bodies on the material create the processed material fatigue breaking mode. This is the main feature of the jar grinding process and explains why jar mill is especially effective in producing highly dispersed products. As a result of the combined mechanical effects of high frequency and periodically arising stress states in the material being milled, weak points always present in the solid material structure are further weakened and breakage of particles occurs in these points.

Coal preparation process at modern coal preparation plants in Russia is characterized by the use of closed water-slurry circuits to produce coal concentrate with required moisture content without thermal drying of fine-grain coal. At the

same time, finely dispersed waste coal of 0–0.5 mm grain size, commonly represented by filter press cake, is sent to waste dump together with waste rock. The filter cake yield is up to 7 % of being prepared coal mass [1–12]. Dispatching this product to waste dump with waste rock is caused by the fact that its use is complicated by high ash content, up to 50 %, and moisture content up to 45 %. Similar situation takes place at the Tugnuisky Coal Preparation Plant LLC of the SUEK OJSC. The annual output of the filter cake at the Plant is 800 kt.

To solve the problem of reducing the yield of waste coal and increasing the yield of commercial products at the Tugnuisky Coal Preparation Plant, it is proposed to use the technology for the production and burning of coal–water slurry fuel (CWF), produced on the basis of the filter cake. Studies have been conducted on the CWF preparation with its following combustion at a semi-commercial installation.



One of the main stages of coal–water slurry (CWS) preparation process is grinding, since it is the stage which allows regulating particle size distribution of the final product. CWS particle size distribution controls CWS's rheological parameters, determines flow properties (flow pattern) of the structured system. It is known that improvement of CWF characteristics is achieved by using a certain amount of fine fraction (0–50 μm) of solid material. There is evidence [12] that, for improving CWS combustion characteristics and stability, the coal fine fraction should amount to up to 50 %, at total solid content of about 70 %. In this case, it is proposed to use waste coal of sufficiently high rank as initial material.

A feature of PFS of modern coal preparation plants (CPP) in Russia is the use of closed water-slurry cycle, which eliminates the slurry discharge outside CPP to external settling sumps and slurry dumps, and no use of thermal drying of fine coal due to their more efficient mechanical dewatering. As a result, the process generates significant amount (up to 10–12 % of CPP raw coal preparation volume) of toxic finely-dispersed waste coal (TFWC) of fineness below 0.5 mm, moisture 30–45 %, and ash content 25–65 %. This product is not in demand at the market, it is refractory (hardly dressable) and, as a rule, is disposed with waste rocks in waste dumps. Given high toxicity of TFWC due to the presence of flocculants and coagulants (applied at CPP) with carcinogenic and mutagenic effects on the particle surface, storage of such dangerous waste creates significant environmental problems in the region.

To solve the problem of TFWC utilization, a technology and a set of equipment have been developed for obtaining slurry coal-water fuel based on TFWC and its efficient burning with capturing and reclamation of the resulting ash-and-slag waste (ASW). The paper discusses the proposed technology and describes operation of the equipment used (reactor-mixers, vertical bi-chamber jar mill, activator pump, boiler with vortex adiabatic combustion chamber, and two-stage flue gas

cleaning system). The results of operation of the created experimental process system for processing TFWC from several Kuzbass CPPs are presented.

To solve the fine waste coal utilization problem, SUEK-Kuzbass JSC adopted a decision to create pilot process system for processing of finely-dispersed waste coal by preparing and burning slurry coal fuel based on filter cake of the SUEK-Kuzbass coal preparation plants.

This decision was based on the studies on preparation and burning of slurry coal fuel, produced on the basis of finely-dispersed waste coal, performed at the pilot-plant stand of Kuzbass State Technical University [13–20]. This paper presents the performed study findings and shows the prospects of solving the existing problem. Thus, the work aim was to prepare the initial data for creating the pilot process system.

Characteristics of the feedstock

To study the opportunity of preparing slurry coal-water fuel based on finely-dispersed waste coal, filter cake samples weighting 2000 kg each were delivered from the CPPs of Komsomolets Mine and Named after S. M. Kirov Mine (S. M. Kirov Mine). The delivered samples were analyzed in coal chemical laboratory. Qualitative characteristics of the studied samples are given in Table 1.

Table 1 data show that moisture of the filter cake samples taken for the research was steadily high: $W_t^r = 35.2\text{--}40.8\%$. Unlike moisture, the filter cake ash content depends on quality of the feedstock and can vary both in narrow range ($A^d = 30.7\%$; 26.8 %) and in wide range, up to 15.6 % ($A^d = 32.8\%$; 48.4 %) for the filter cake from the CPP of the Named after S. M. Kirov Mine. Particle size distribution of the filter cake from the CPPs of the Komsomolets Mine and Named after S. M. Kirov Mine included fineness range up to 3.0 mm [6–9].

Table 1

Qualitative Characteristic of the Tested Samples

Indicator	Coal-preparation plant of Komsomolets Mine		Coal-preparation plant of S.M. Kirov Mine	
	Sample No. 1	Sample No. 2	Sample No. 3	Sample No. 4
Moisture, weight %	35.2	34.8	40.3	40.8
Ash content (on dry basis), %	30.7	26.8	32.8	48.4
Volatile-matter yield (on dry ash-free basis), %	43.0	43.1	42.4	41.4
Sulfur total (on dry basis), %	0.52	0.48	0.15	0.13
Higher heating value (on dry basis), MJ/kg	33.70	33.04	33.08	33.00
Lower heating value of combustible mass, MJ/kg	13.75	14.3	11.8	8.7
Grain size, mm				
0.250–3.000	5.7	8.4	4.5	6.3
0.071–0.250	15.1	18.7	26.8	17.3
< 0.071	79.2	72.9	68.7	76.4
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

Research technique for preparation of slurry coal fuel

The filter cake is actually semi-finished product for producing coal-water fuel with characteristics allowing it to be efficiently burned in boiler swirling-type furnace or co-fired with traditional fuel in coal-fired boiler units.

Evaluation of the possibility of preparing CWF from coal waste (filter cakes of the Komsomolets mine and the S.M. Kirov mine) and selection of the optimal plasticizing additive were carried out under laboratory conditions using universal vibration testing machine.

In the process of the research, laboratory samples of slurry coal fuel were prepared by mixing the filter cake and aqueous solution of plasticizing agent. Considering the initial fineness of the filter cake, for the CWF samples preparation, mixing or grinding chamber of periodic action at the universal vibration testing machine was used. Dosing of the initial components was performed manually. The purpose of the laboratory studies was to select the optimal plasticizing additive option based on the analysis of the prepared CWF main structural and rheological characteristics.

The CWF samples were analyzed for solid phase weight fraction, particle size distribution, and viscosity. Static stability was determined by the presence of sediment and water gain during storage of the

sample in static conditions. The solid phase mass fraction was determined by standard drying method according to GOST 27314–91, or according to GOST 11014–2001; the particle size distribution, by wet sieving on 0.355 mm, 0.250 mm, and 0.071 mm sieves according to GOST 2093–82; and the ash content, according to GOST 11022–95. The lower calorific value was calculated using the measured values of the weight fraction and ash content of the solid phase. Recalculation of the analysis results for various fuel states was carried out according to GOST 27313–95.

Viscosity measurements were carried out using RHEOTEST rotational viscometer in the range of shear rate from 1.0 to 437.4 s⁻¹ with standard cylinder system S2. The measurement temperature was 20±5 °C [6–12].

Further, at the pilot-plant stand (in semi-industrial conditions), the processes of CWF pilot batch preparation and combustion in the boiler unit of the pilot-plant stand were developed and optimized. At the same time, the composition and amount of harmful emissions originated during the combustion were determined at the stand.

Based on findings of the studies on the CWF preparation at the universal vibration testing machine in two ways (mixing and grinding), optimal type of the plasticizing additive (high molec-

ular weight inorganic compound), its consumption (0.3 %) and the solid phase mass fraction in the prepared fuel (57.0 %) were determined.

Then, on the basis of the results obtained, experimental CWF batches were prepared at the experimental stand using the process flow sheet (PFS) shown in Fig. 1.

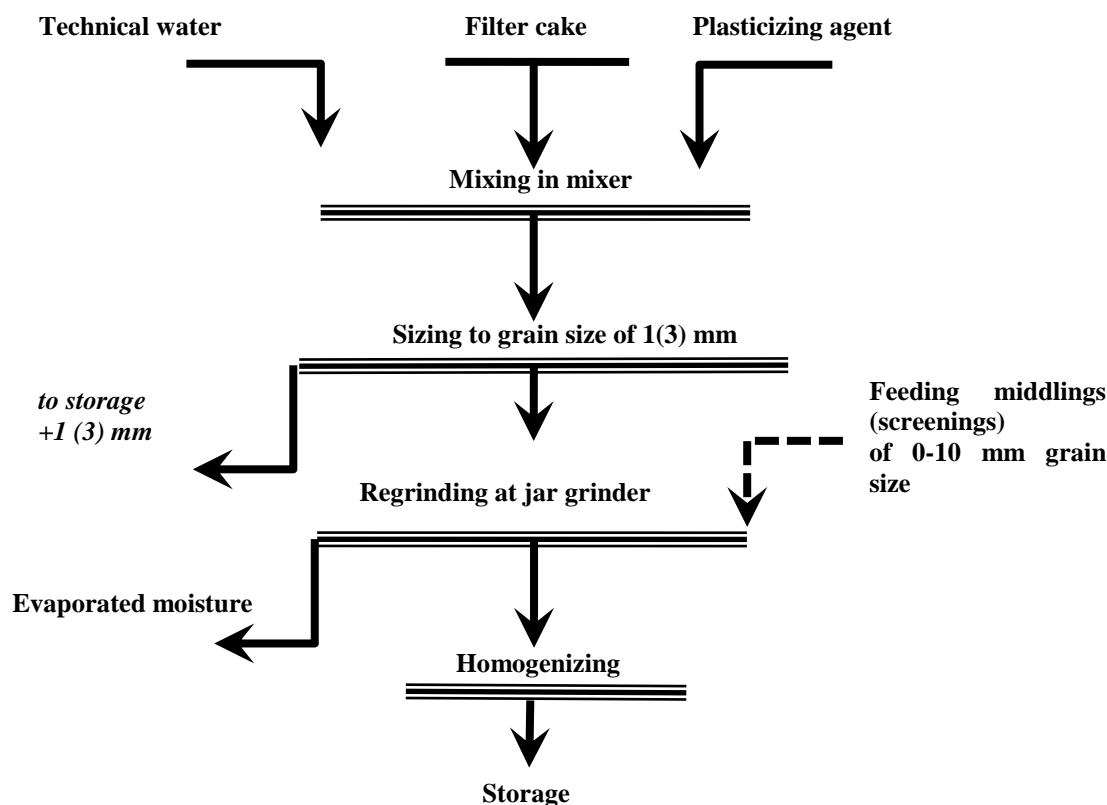


Fig. 1. Process Flow Sheet of the CWF Preparation from Filter Cake

According to the PFS, the initial filter cake and aqueous solution of the plasticizing agent were fed to the batch mixer, and then the produced water-coal slurry (in metered amounts) was fed to the universal vibration-testing machine, where re-grinding and further mixing of the produced CWF was carried out. The universal vibration-testing machine is a bicameral jar mill, consisting of concentrically located cylindrical chambers, filled with grinding balls and interconnected by channels. The initial slurry enters the inner (central) chamber of the jar mill, moves down and through the channels enters the peripheral chamber. In the peripheral chamber, the slurry moves upward. Discharge of the milled material is carried out through the external threshold of the peripheral

chamber. This principle of the jar mill operation allows for low energy consumption for grinding particles in the mixture at the required size of large particles in the finished CWF. The prepared CWF was pumped into storage tanks [12].

In order to stabilize the CWF quality in terms of ash content, the option of supplying screenings or crushed middlings of grain size of 0 to 10 mm to the jar mill was provided.

The influence of mechanical activation on the structural and rheological characteristics of finely dispersed coal slurries, produced on the basis of filter cakes in the specially created experimental activator pump, was determined. In the activator pump, the CWF was processed under conditions of shear strain in the gap of 0.2–0.3 mm

between two disks at relative angular frequency of revolution of the movable disk of 2900 rpm. As a result, at the peripheral part of the disk, the shear rate reached 2100–3160 s⁻¹, i.e. the conditions corresponding to the ultimate failure of the structure were obviously implemented. Passing the

produced CWF through the activator pump reduced viscosity of the slurry by 30 % and increased static stability of the CWF.

Table 2 shows structural-rheological and thermophysical indicators of the CWF pilot batches.

Table 2

Characteristics of the Prepared CWF Pilot Batches

Ash content A^d , %	Yield of >0.25 mm grain size, %	Solid phase weight frac- tion, C_s , %	Effective viscosity at shear rate of 81 s ⁻¹ , η , MPa·s	Stability, days	Lower heating value, Q_i^r , MJ/kg
Filter Cake of Coal-Preparation Plant of Komsomolets Mine					
26.8	1.9	56.9	178	15	12.22
Filter Cake of Coal-Preparation Plant of S.M. Kirov Mine					
48.4	1.4	56.6	148	15	8.24

It was experimentally determined that the performance of the universal vibration-testing machine on the initial slurry ranges 0.155–0.217 tph depending on particle size of the initial slurry. At this operation mode of the machine, the yield of class +0.250 mm to the finished slurry did not exceed the limiting value, required under the burning conditions ($R_{250} \leq 5\%$) and amounted to 1.4–1.9 %.

Considering that the content of micron classes of fineness in the initial product — filter cake — is usually more than 70 % (see Table 1), it is advisable to install a rod mill for re-grinding operation in the pilot process system. The use of the rod mill makes it possible to obtain solid phase particles of more uniform size, and the presence of micron-size particles in the initial product further contributes to this. Thus, it becomes possible to provide the solid phase particle size distribution in the finished milled product to be close to bimodal. As a result, the solid phase content in the

finished fuel increases by 2–3 % while maintaining favorable structural rheological characteristics, that, in turn, leads to increasing the fuel heating value. To implement this condition, the rod jar mill design was developed (Fig. 2); the operation concept of the mill is similar to that of the bicameral ball jar mill at the demonstration stand.

The jar mill consists of housing (1), divided by inserts (2) into central (3) and peripheral (4) voids, which are hydraulically interconnected by slots (5) formed between the lower edges of the inserts and the bottom (6) of the housing. Feeding funnel (8) is installed on the upper cover (7) of the housing. The voids are filled with grinding bodies (9) (rods, balls). The voids are of rectangular shape that allows using rods as grinding media. Outside of the peripheral voids on their outer side walls (10), outlet gutters (11) are fixed, connected to the drain pipes (12). The housing is mounted on frame (13) with springs (14). Vibration exciter (15) is fixed on the housing bottom.

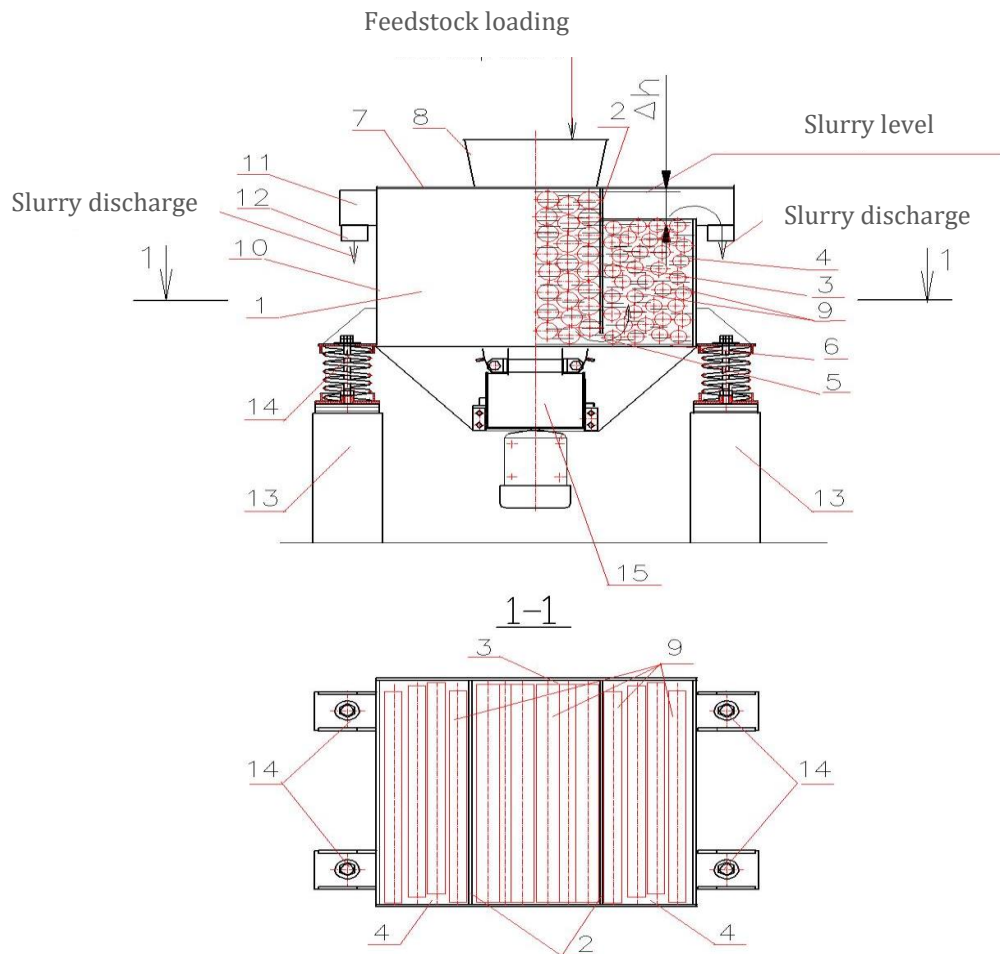


Fig. 2. Design of the Developed Jar Mill

The jar mill operates as follows. The source material and liquid phase (water) through the feeding funnel 8 are fed into the central void 3 of the jar mill chamber, filled with grinding medium (rods or balls). Due to the impact of the vibrating grinding medium provided by vibration exciter 15, mixing of the incoming products and preliminary wet grinding of the solid material particles are carried out. The resulting slurry through the slots in inserts 2, enters the outer peripheral voids 4 of the chamber, also filled with grinding medium (rods or balls), under the shaking action of which wet grinding of the solid particles continues. In this case, grinding medium moves upward at speed being substantially lower than in the central void that ensures high grinding efficiency at lower energy consumption. In this case, the slurry movement speed in the void is controlled by changing the difference in level of the slurry in the central and peripheral voids due to change in

the height of the outer side walls of the peripheral voids. Since the material solid particle fineness in the central and peripheral voids is different, the size of the grinding bodies in the peripheral voids is smaller than that in the central one. The milled product from the peripheral voids is discharged through the inner wall of the outlet gutters 11 and tubes 12 into receiving tank (not shown in Fig. 2). Thus, special design of the camera in compliance with the proposed option enables using both balls and rods as grinding bodies. This ensures implementation of more efficient wet grinding of material in the jar mill to provide particle size distribution close to bimodal when processing mixture of materials of different fineness [12–14].

CWF Burning at Pilot-Plant Stand

The pilot batches of CWF were burned in the boiler unit consisting of a boiler with thermal output of 0.63 MW, fuel supply system, ash collection system, blower heater for heat removal,

and draft equipment [13]. The created boiler consists of a firebox – a vortex combustion chamber located in water-cooled case, and an economizer for removing heat from hot flue gases generated in the firebox. CWF is tangentially fed to the vortex furnace through a burner with pneumomechanical nozzle. Blasting air is also tangentially fed to the combustion chamber. The fuel is sprayed by compressed air fed to the nozzle. The fuel feeding is controlled by changing the fuel

pump motor speed. The combustion chamber is equipped with water-cooled throat, which allows to hold burning coal particles and sprayed CWF droplets during the time required for their complete burning. The two-stage dust collection system consists of multicyclone collector and fabric filter providing high efficiency of dust collection from the exhaust gases. Table 3 presents the results of the tests on the CWF pilot batch burning.

Table 3**Results of the Tests on Combustion of the Coal-Water Fuel Pilot Batches**

Indicator	Value for Coal-Preparation Plant of:	
	S.M. Kirov Mine	Komsomolets Mine
Boiler thermal output, MW	0.47–0.57	0.52–0.66
Temperature conditions in firebox, °C	980–1050	980–1050
CWF consumption, kg/hr	220–250	170–210
CWF pressure, MPa	0.20	0.19
Compressed air pressure, MPa	0.21	0.20
Furnace off-gases temperature, °C	250–260	250–260
Energy efficiency ratio, %	0.83	0.85

Conclusions

1. The process and equipment have been developed for preparation and burning (at small and medium capacity boiler plants) of slurry coal-water fuel, produced from finely dispersed coal preparation waste (filter cakes) from coal preparation plants of Komsomolets Mine and Named after S. M. Kirov Mine. It was shown that, based on these wastes, it is possible to produce slurry coal-water fuel with solids content of 56–60 %, the required structural and rheological characteristics, and lower heating value of up to 13 MJ/kg.

2. The boiler of thermal output of 0.63 MW with vortex combustion system, efficiently operating using coal waste fuel, was developed, manufactured and tested. The boiler operation tests on

the CWF showed its high efficiency (83–86 %), with the level of harmful emissions in the flue gases being significantly below the permissible values. High performance was achieved in terms of the CWF carbon in fly ash and incomplete combustion (below 5 % and 80 mg/m³, respectively, much below corresponding permissible values).

Based on the research findings, detail design was developed for creation of the pilot process system for processing of waste coal to produce slurry coal-water fuel for burning at boiler plants. Assessment of using the whole volume of the SUEK Kuzbass coal preparation plants waste coal at the nearby Belovskaya SDPP was performed, which showed high economic and environmental efficiency of the proposed project.

References

1. Kaplunov D. R., Radchenko D. N. Design principles and selection of subsurface use technologies ensuring sustainable development of underground mines. *Mining Journal*. 2017;(11):52–59. (In Russ.).
2. Wan E. I., Fraser M. D., Logan C. N. Low sulphur coal-water fuel to retrofit coal-fired to comply with US clean air act amendments of 1990. In: *Proceedings of the IEA-CLM*. Clearwater, FL, USA – Paris, France, International Energy; 1993. P. 22.
3. Ashworth R. A., Melick T. A., Morrison D. K., Battista J. J. Electric utility CWS firing options to reduce NO_x emissions. In: *Twenty Third International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, Coal & Slurry Technology Association and ASME-FACT*. Clearwater, Florida; 1998. P. 719–730.

4. Morrison J. D., Scaroni A. W., Battista J. J. The use of coal slurries for production of coal-water fuel. In: *XIII International Coal Preparation Congress*. Brisbane, Australia;1998. P. 643–645.
5. Alaa M. Musalam and Abdel Fattah A. Qaraman. The thermal behavior of the coal-water fuel (CWF). *International Journal of Energy and Environmental Research*. 2016;4(3):27–36.
6. Murko V. I., Karpenok V. I., Senchurova Yu. A., Khyamyalyainen V. A., Tailakov O. V. Study of sulfur oxide reduction during combustion of coal-water slurry. In: *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*; 2016. P. 297–300.
7. Murko V., Hamalainen V., Baranova M. P. Use of Ash-and-Slag Wastes after Burning of Fine-Dispersed Coal-Washing Wastes. In: *IIIrd International Innovative Mining Symposium E3S Web of Conferences*; 2018. Vol. 41. DOI: 10.1051/e3sconf/20184101042.
8. Baranova M. Energy and Resource-Saving Sources of Energy in Small Power Engineering of Siberia. In: *Founder Of The Second International Innovative Mining Symposium*; 2017. Vol. 21. DOI: 10.1051/e3sconf/20172102001.
9. Murko V. I., Fedyayev V. I., Karpenok V. I., Zasyupkin I. M., Senchurova Y. A., Riesterer A. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel. *Thermal Science*. 2015;19(1):243–251.
10. Murko V. I., Puzyryov E. M., Karpenok V. I., Fedyayev V. I., Baranova M. P. The Usage of Boilers with a Furnace for Burning Enrichment Products and Deballasting Coal. In: *XVIII International Coal Preparation Congress*; 2016. P. 345–350. DOI: 10.1007/978-3-319-40943-6_51.
11. Murko V. I., Fedyayev V. I., Aynetdinov H. L., Baranova M. P. Environmentally clean technology of fine waste coal utilization. In: *The 17th International Coal Preparation Congress*. Turkey; 2013. P. 679–682.
12. Murko V. I., Fomicheva M. P., Timoshevskiy A. N., Zasyupkin I. M., et al. Patent No. 2145038. M.cl. F 23 Q 5/00. *Method of Combustion and Combustion Stabilization of the Water-Coal Fuel in the Settling Chamber*. No. 97120914/06. Appl. 03.12.97. Published on 27.01.2000, Bulletin No. 3. (in Russ.).
13. Biletskiy V., Sergeyev P. and Krut O. Fundamentals of highly loaded coal-water slurries. *Mining of Mineral Deposits*. Taylor & Francis Group, London; 2013. P. 105–113.
14. Kijo-Kleczkowska A. Analysis of cyclic combustion of the coal-water slurry. *Archives of Thermodynamics*. 2011;32(1):45–75.
15. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water slurries. *Fuel*. 2011;90(2):865–868.
16. Suetina T. A., Kochetkov A. V., Tolmachev A. G., Li Zhoy, Peng Lin. Features of automatic control of primary crushers. *Science Studies*. 2015;7(5):2–11. (In Russ.).
17. Lagunov Yu. A. Substantiation of crushing-and-grinding facility parameters. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2000;(4):79–82. (In Russ.).
18. Zelin Zhang, Jianguo Yang, Dongyang Dou. A surface probability model for estimation of size distribution on a conveyor belt. *Physicochem. Probl. Miner. Process*. 2014;50(2):591–605.
19. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Geomechanical terms of use of the mill tailings for preparation. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015;(4):321–324.
20. *Proenergomash*. Available from: www.pem-energo.ru [Accessed 18.10.2017].

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24

Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком

Кононов А. В.¹, Дуйсебаев Б. О.²¹Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева, Усть-Каменогорск, Республика Казахстан²АО «Волковгеология», Алматы, Республика Казахстан

Аннотация: До сегодняшнего дня интенсификация процессов ионного обмена (сорбция, десорбция, отмывка ионита) была насущной проблемой при получении товарных десорбатов. В настоящей статье представлены материалы исследования влияния наложенного ультразвукового (УЗ) воздействия на процесс сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу действующего рудника подземного скважинного выщелачивания (ПСВ) при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания. Для исследования и оценки эффективности интенсификации процессов ионного обмена наложением ультразвука в цехе переработки продуктивных растворов на одном из рудников АО «НАК «Казатомпром» были проведены работы по интенсификации процесса сорбции урана из продуктивных растворов ультразвуком. Периодически создаваемые УЗ-излучателями импульсы воздействуют на весь рабочий внутренний объем массообменного аппарата. Таким образом, вся масса реагентов находится в движении, и вся поверхность зерен анионита непрерывно очищается в процессе работы УЗ-оборудования. В результате проведенного исследования удалось установить, что УЗ-интенсификация процесса сорбции позволяет:

- при содержании урана в маточниках сорбции 0,003 г/м³ увеличить скорость сорбции в 6,4 раза;
- при содержании урана в маточниках сорбции 0,014 г/м³ увеличить скорость сорбции в 1,4 раза;
- за счет применения УЗ-воздействия получить средневзвешенное увеличение скорости сорбции в 1,3 раза;
- увеличить полную динамическую обменную емкость ионита по урану в 1,13 раза и при этом не уменьшить величину механической прочности зерен ионита.

Ключевые слова: ионный обмен, интенсификация процессов массообмена, ионит, ионообменная смола, сорбция, имплозия, кавитация, диффузия, УЗ-колебания, продуктивный раствор, уран.

Для цитирования: Кононов А. В., Дуйсебаев Б. О. Интенсификация сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):12-24. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24.

Ultrasonic Intensification of Uranium Sorption from Pregnant Solutions by Ion-Exchange Resin

A. V. Kononov¹, B. O. Duisebayev²¹D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan²JSC "Volkovgeologia", Almaty, Republic of Kazakhstan

Abstract: Until now, the intensification of ion exchange processes (sorption, desorption, washing of ion exchanger) remains an urgent problem in obtaining commercial strippants. This paper presents the study of ultrasonic (US) effects on the process of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin at operating in-situ leach recovery ("ISR") uranium production. The study and evaluation of effectiveness of ultrasonic intensifying the ion exchange processes was implemented at one of the mines of NAC Kazatomprom JSC. Ultrasonic pulses periodically generated by emitters produced effects on the whole working space of the mass transfer apparatus. Thus, the whole mass of reagents is kept in continuous motion, and the whole surface of the anion exchanger grains is permanently purified during the ultrasonic device operation. The study findings showed that the ultrasonic intensification of the sorption process allows:

- increasing the sorption rate by 6.4 times at uranium concentration in the pregnant solutions of 0.003 g/m³;
- increasing the sorption rate by 1.4 times at uranium concentration in the pregnant solutions of 0.014 g/m³;



- achieving weighted average increasing the sorption rate by 1.3 times through applying the ultrasonic treatment;
- increasing full dynamic exchange capacity of the ion exchange resin for uranium in 1.13 times at keeping mechanical strength of the ion exchanger grains.

Keywords: uranium, ion exchange, intensification of mass transfer processes, ion exchanger, ion exchange resin, sorption, implosion, cavitation, diffusion, ultrasonic vibrations, pregnant solution.

For citation: Kononov A. V., Duisebayev B. O. Ultrasonic intensification of uranium sorption from pregnant solutions by ion-exchange resin. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):12-24. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-12-24.

Определения, используемые в статье

Диффузия – процесс взаимного проникновения молекул или атомов одного вещества между молекулами или атомами другого, приводящий к самопроизвольному выравниванию их концентраций по всему занимаемому объему.

Интенсификация – процесс и организация развития производства, в которых применяются наиболее эффективные средства производства, а также расширение производства, увеличение его производительности.

Ионит – твердое нерастворимое вещество, способное обменивать свои ионы на ионы из окружающего их раствора. Обычно это синтетические органические смолы, имеющие кислотные или щелочные группы. Иониты подразделяются на катиониты, поглощающие катионы, аниониты, поглощающие анионы, и амфотерные иониты, обладающие обоими этими свойствами.

Ионообменная смола – синтетический органический ионит, высокомолекулярное синтетическое соединение с трехмерной гелевой и макропористой структурой, которое содержит функциональные группы кислотной или основной природы, способные к реакциям ионного обмена.

Кавитация – образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных паром, возникающее в результате внешних физических воздействий.

Маточник сорбции – продуктивный раствор после процесса сорбции.

Продуктивный раствор – раствор, содержащий полезный компонент.

Сорбция – процесс поглощения твердым телом (сорбентом) различных веществ из окружающей среды независимо от механизма поглощения.

Ультразвуковой излучатель – устройство, преобразующее электрические колебания, создаваемые генератором высокой частоты, в УЗ-колебания.

Введение

На сегодняшний день урановой промышленности необходимы новые технические решения для увеличения качества выпускаемой продукции и снижения ее себестоимости. Одним из таких решений может стать использование УЗ-технологий при производстве урана методом подземного скважинного выщелачивания.

Применение УЗ-технологий в различных отраслях промышленности и народного хозяйства известно еще с середины прошлого века и получило большое распространение в республиках СССР. Актуальность УЗ-технологий не снизилась и сегодня, они используются в нефтяной, пищевой промышленности, медицине и т.д.

Ультразвуковые технологии в урановой промышленности могут применяться в таких процессах, как выщелачивание, сорбция, десорбция, отмывка зерен ионита от примесей (фосфор, железо, кремний и т.д.), экстракция, реэкстракция и осаждение. Интенсификация ионообменных процессов ультразвуком до-

стигается за счет уменьшения толщины диффузионного слоя. Возникающие в жидкости под влиянием УЗ-колебаний турбулентные потоки, имплозия и кавитация, звуковое давление и некоторые другие эффекты второго порядка изменяют характер диффузионного граничного слоя, непосредственно прилегающего к поверхности зерен ионита, толщиной которого лимитируется скорость процессов ионного обмена, что и приводит к интенсификации.

1. Влияние ультразвука на процесс сорбции урана

В настоящей статье описано исследование влияния наложенного УЗ-воздействия на процесс сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу действующего рудника ПСВ.

Одним из весьма эффективных методов интенсификации сорбционных процессов является обработка ионитов ультразвуком. Эффекты второго порядка, вызываемые ультразвуком определенной частоты и интенсивности, – главным образом имплозия и кавитация, приводят к более полному раскрытию микропор в зернах ионообменной смолы и к полной очистке их поверхности, что неизбежно вызывает заметное увеличение сорбционной емкости смолы. Ультразвук не только действует на поверхностные слои зерен ионита, но и изменяет их капиллярную структуру, а также увеличивает компенсированные молекулярные силы на общей поверхности, включая и поверхность, выстилающую стенки микро- и макро- капилляров.

Кавитационные явления и так называемый ультразвуковой ветер, обуславливающие интенсивное перемешивание жидкости в макро-, а в особенности в микрообъемах, снижают градиенты концентрации растворенных веществ на границе твердой и жидкой фаз, что должно уменьшить время насыщения сорбента извлекаемыми из растворов ценными компонентами, в данном случае ураном.

Скорость химических реакций, протекающих в гетерогенных системах, зависит от

скорости диффузии молекул к границам раздела фаз, химического взаимодействия и диффузии продуктов реакции. В большинстве случаев скорость химического взаимодействия достаточно велика по сравнению со скоростями диффузии, вследствие этого скорость всей реакции в целом при достаточно развитой поверхности контакта фаз определяется скоростью диффузии реагентов и продуктов реакции.

Основное сопротивление процессу массообмена оказывает диффузионный слой, расположенный на границе раздела фаз, в связи с тем, что процесс переноса вещества в нем происходит наиболее медленно – путем молекулярной диффузии. Толщина и свойства диффузионного слоя сильно влияют на скорость протекания гетерогенных процессов. Турбулентные потоки, возникающие при интенсивном перемешивании, уменьшают эффективную толщину слоя, оказывающего сопротивление переносу вещества. С увеличением скорости перемешивания возрастает и скорость всего гетерогенного процесса. При наложении УЗ-поля процесс значительно ускоряется. Имплозия и кавитация, акустическое давление, звуковой ветер вызывают интенсивные турбулентные потоки не только во всей массе обрабатываемого раствора, но и в непосредственной близости к границе раздела фаз, отчего сильно уменьшается граничный диффузионный слой.

Были проведены исследования интенсификации сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу под воздействием ультразвука с частотой колебаний 22 кГц. Показано, что с уменьшением толщины граничного диффузионного слоя процесс может ускориться в несколько раз. Равновесное состояние под действием ультразвука достигалось по времени в 4–5 раз быстрее, чем при идентичных условиях сорбции, но без наложения ультразвука. Для чистоты эксперимента все опыты проводились на двух одинаковых ионообменных аппаратах СНК-640, на

которые под контролем электронных расходомеров подавалось одинаковое количество продуктивных растворов и ионообменной смолы. При этом одна колонна (с ультразвуком) была испытательной, а вторая (без ультразвука) – контрольной.

Ультразвук вводили в емкость с ионитом и продуктивным раствором при помощи металлического УЗ-излучателя погружного типа. При таком способе введения ультразвука раствор дополнительно еще и немного нагревался. С повышением температуры время, необходимое для установления равновесия, еще более уменьшалось. В результате повышения температуры время установления равновесия уменьшается в среднем вдвое, а под влиянием УЗ-волн – еще приблизительно в 3 раза. Наибольшее ускорение процесса ионного обмена было достигнуто при УЗ-обработке смолы и раствора при 40 °С.

2. Описание оборудования, используемого в опытах

В проведенных экспериментах основным оборудованием являлись два одинаковых ионообменных аппарата типа СНК-640 и УЗ-агрегат.

Каждая сорбционная колонна (рис. 1) выполняет функцию емкости со смолой, через которую пропускается продуктивный раствор. Технические характеристики колонны приведены в табл. 1.

Ультразвуковой агрегат (рис. 2) используется как основное оборудование, вызывающее интенсификацию процесса сорбции, его параметры приведены в табл. 2.

3. Определение влияния ультразвука на сорбцию урана

Опыты по определению влияния ультразвука на процесс сорбции урана проводились в сопоставимых условиях на двух сорбционных колоннах типа СНК-640 (рис. 3).

При проведении опытов определялось влияние ультразвука на скорость сорбции и полную динамическую обменную емкость ионита при сорбции урана из продуктивных растворов действующего рудника ПСВ урана. Опыты проводились на двух однотипных сорбционных колоннах, на одну из которых был установлен УЗ-агрегат. Продуктивный раствор подавался на обе колонны одновременно с идентичными параметрами подачи. Место установки УЗ-агрегата на колонне приведено на рис. 3. Для проведения эксперимента в каждую колонну было загружено по 0,297 м³ ионита, взятого из процесса и прошедшего десорбцию, денитрацию и хвостовую отмывку.

Содержание урана на исходном ионите составило 2,68 кг/м³.

Количество подаваемых на колонны продуктивных растворов регулировалось по показаниям электронных расходомеров, предварительно прошедших тарировку.

Таблица 1

Технические характеристики колонны СНК-640

Technical characteristics of SNK-640 ion exchange column

Параметр	Значение
Габариты колонны в сборе, мм	1160×1160×3700
Диаметр колонны, мм	640
Объем сорбента, м ³	0,7
Высота рабочего слоя сорбента, м	2,2
Объем перерабатываемых растворов, м ³ /ч	0,2–5,0
Линейная скорость движения растворов, м/ч	0,6–16,0
Объем перегружаемого сорбента, дм ³ /ч	75–225

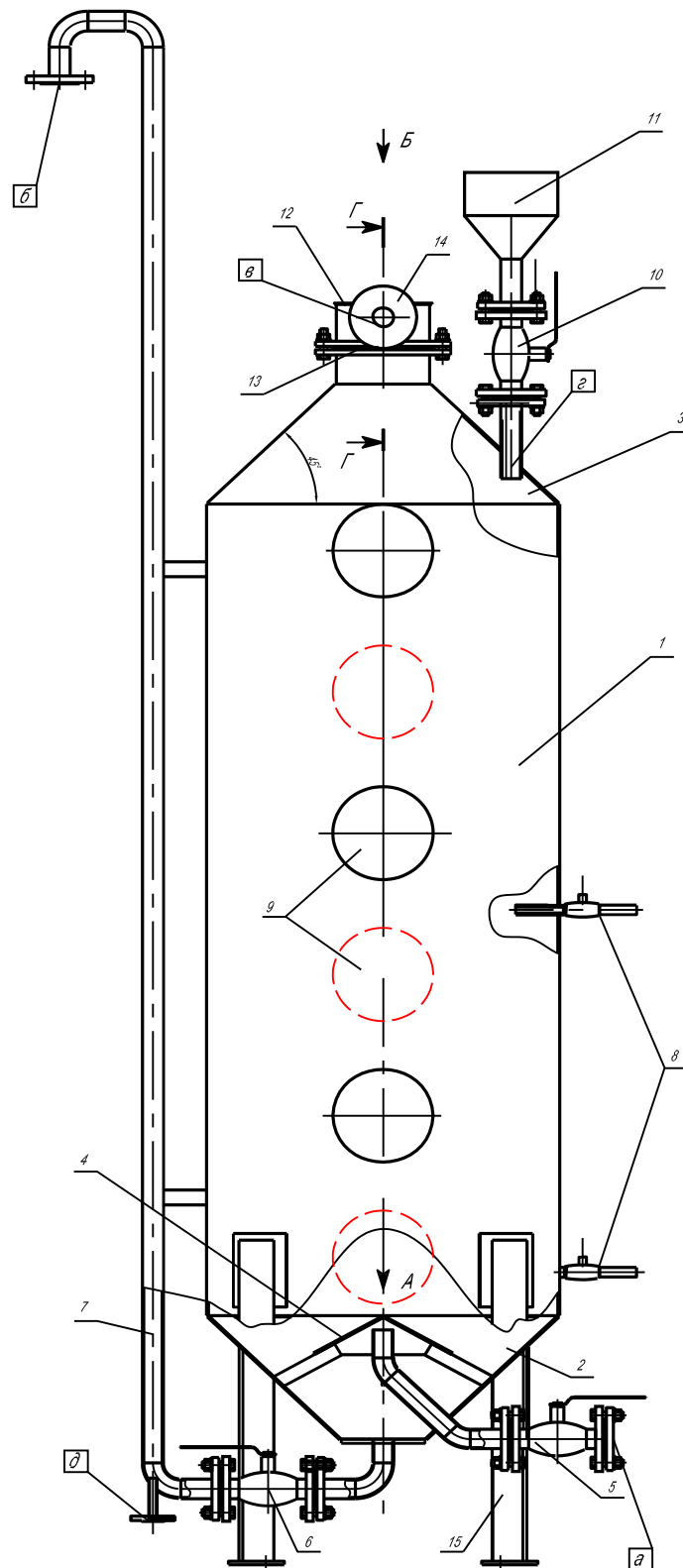


Рис. 1. Сорбционная напорная колонна СНК-640:

1 – корпус; 2 – нижний конус; 3 – верхний конус; 4 – расщепитель раствора; 5 – кран подачи смеси раствора; 6 – кран выгрузки насыщенного сорбента; 7 – эрлифт (airlift); 8 – пробоотборники; 9 – смотровые окна; 10 – кран загрузки ионита; 11 – приемный бункер ионита; 12 – оголовок; 13 – дренажный узел; 14 – вывод маточников сорбции; 15 – опора

Fig. 1. SNK-640 ion exchange pressure column:

1 – body; 2 – lower cone; 3 – upper cone; 4 – solution divider; 5 – solution supply tap; 6 – saturated sorbent discharge tap; 7 – airlift; 8 – samplers; 9 – viewing windows; 10 – ion exchanger loading tap; 11 – ion exchanger receiving hopper; 12 – tip; 13 – drainage unit; 14 – sorption mother liquor outlet; 15 – support

Параметры ультразвукового агрегата
Parameters of the ultrasonic unit

Параметр	Значение
Габаритные размеры ультразвуковой колебательной системы, мм	Ø215×750
Интенсивность ультразвукового воздействия, Вт/см ²	>10
Длина силового кабеля, м	25
Питание от сети переменного тока напряжением, В	220±22
Максимальная потребляемая мощность, ВА	<3000
Диапазон регулирования мощности, %	40–100
Время непрерывной работы, ч	8
Габаритные размеры электронного блока, мм	640×450×250

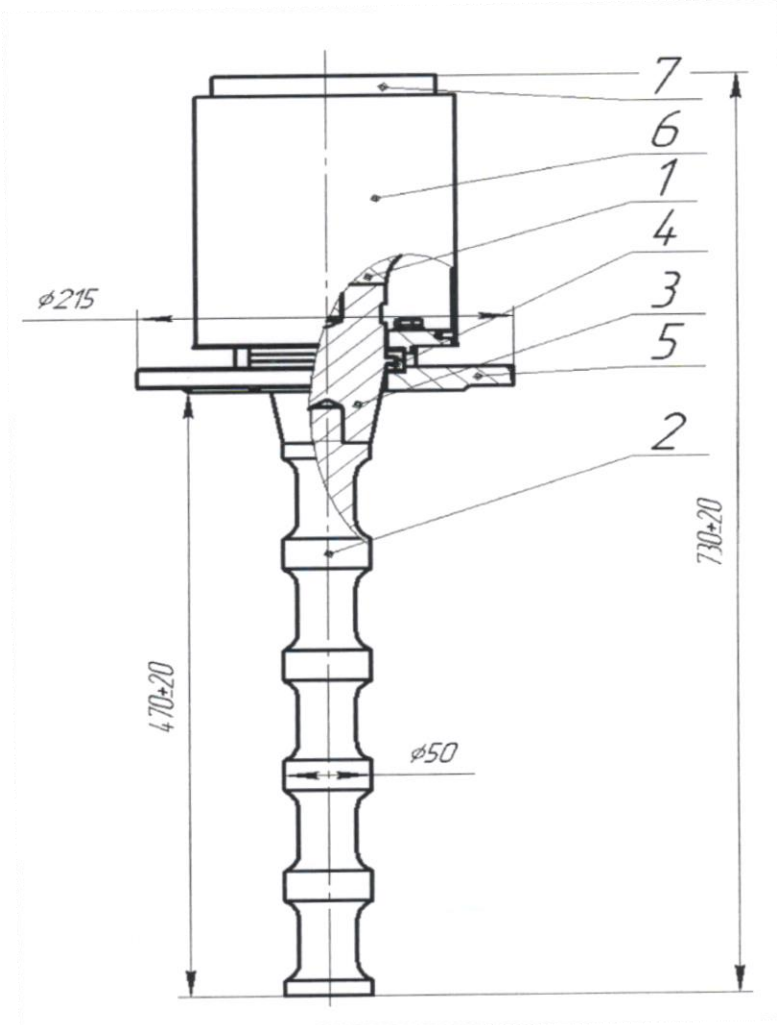


Рис. 2. Ультразвуковая колебательная система (агрегат) погружного типа:

1 – ультразвуковая колебательная система (набор пьезокристаллов); 2 – рабочий излучающий инструмент; 3 – бустерное звено; 4 – герметичное уплотнение; 5 – фланец ультразвуковой колебательной системы; 6 – корпус; 7 – вентилятор

Fig. 2. Immersion ultrasonic oscillatory system (unit):

1 – ultrasonic oscillatory system (a set of piezocrystals); 2 – working emitting tool; 3 – booster link; 4 – tight seal; 5 – flange of the ultrasonic oscillatory system; 6 – body; 7 – fan



Рис. 3. Установка УЗ-агрегата на сорбционную колонну СНК-640

Fig. 3. Installation of the ultrasonic unit on the SNK-640 ion exchange column

Таблица 3

Результаты опыта 1

Test 1 Results

Колонна	Время процесса, мин	Показания расходомера, м ³ /ч	Наименование раствора	Содержание U, кг/м ³
Без использования ультразвука (контрольная)	120	2,4	Продуктивный раствор	0,048
			Маточник сорбции	0,002
С использованием ультразвука (испытательная)	120	2,4	Продуктивный раствор	0,048
			Маточник сорбции	0,001

На начальном этапе испытаний количество подаваемого продуктивного раствора (ПР) на колонны по показаниям расходомеров составило:

- без УЗ-агрегата – 2,4 м³/ч;
- с УЗ-агрегатом – 2,4 м³/ч.

Общее время сорбции на начальном этапе составило 2 ч. Результаты опыта приведены в табл. 3.

Повышенное содержание урана в маточнике сорбции на колонне без использования

ультразвука по сравнению с маточником сорбции, выходящим из колонны с установленным УЗ-агрегатом в первые 2 ч, указывает на очень большое количество подаваемого на сорбцию продуктивного раствора. Так, отношение объема подаваемого ПР к объему ионита составило 8,08 V_p/V_c в час.

Следующий опыт проводился с уменьшением объема подачи ПР на колонну без УЗ-агрегата, равным 5,86 V_p/V_c в час. Результаты опыта приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты опыта 2

Test 2 Results

Опыт	Время процесса, мин	Показания расходомера, м ³ /ч	Наименование раствора	Содержание U, кг/м ³
Без использования ультразвука (контрольная)	60	1,74	Продуктивный раствор	0,050
			Маточник сорбции	0,001
С использованием ультразвука (испытательная)	60	2,40	Продуктивный раствор	0,050
			Маточник сорбции	0,001

Результаты опыта по определению ПДОЕ при сорбции урана из ПР
The results of the experiment on determining full dynamic exchange capacity
at uranium sorption from pregnant solutions

Колонна без ультразвука (контрольная)					Колонна с ультразвуком (испытательная)				
Время, ч	V_p/V_c	Содержание U в ПР, г/дм ³	Содержание U в маточниках сорбции, г/дм ³	Содержание U на смоле, кг/м ³	Время, ч	V_p/V_c	Содержание U в ПР, г/дм ³	Содержание U в маточниках сорбции, г/дм ³	Содержание U на смоле, кг/м ³
1	5,860	0,050	0,0020		1	8	0,050	0,0010	
2	8,260	0,048	0,0020		2	10	0,048	0,0010	
5	25,400	0,048	0,0040		5	34,01	0,048	0,0020	
8	34,180	0,049	0,0050	3,96	8	47,88	0,049	0,0020	5,70
11	51,180	0,049	0,0070		11	71,72	0,049	0,0050	
14	67,950	0,048	0,0080	6,03	14	95,29	0,048	0,0060	7,54
17	84,810	0,049	0,0090		17	118,92	0,049	0,0070	
20	101,48	0,049	0,0110	7,91	20	142,56	0,049	0,0090	9,98
23	118,69	0,049	0,0120		23	166,23	0,049	0,0110	
26	135,52	0,049	0,0140	9,66	26	189,90	0,049	0,0140	12,42
29	152,39	0,049	0,0150		29	213,70	0,049	0,0170	
32	169,39	0,051	0,0180	11,73	32	237,54	0,051	0,0200	16,33
35	186,33	0,050	0,0210		35	261,31	0,050	0,0230	
38	203,13	0,049	0,0215	13,48	38	284,95	0,049	0,0250	16,87
41	219,93	0,048	0,0220		41	308,48	0,048	0,0240	
44	236,70	0,048	0,0230	14,31	44	332,09	0,048	0,0270	17,34
47	253,40	0,048	0,0240		47	355,62	0,048	0,0276	
50	270,40	0,049	0,0256	15,87	50	379,53	0,049	0,0294	17,56
53	287,74	0,050	0,0264		53	404,24	0,050	0,0308	
56	304,41	0,050	0,0274	16,01	56	427,81	0,050	0,0322	18,26
59	321,01	0,050	0,0284		59	451,52	0,050	0,0330	
62	337,71	0,049	0,0286	17,25	62	475,25	0,049	0,0326	19,55
65	354,38	0,050	0,0302		65	498,72	0,050	0,0342	
68	371,75	0,049	0,0308	18,86	68	514,58	0,049	0,0356	21,62
71	382,32	0,050	0,0314		71	530,44	0,050	0,0370	

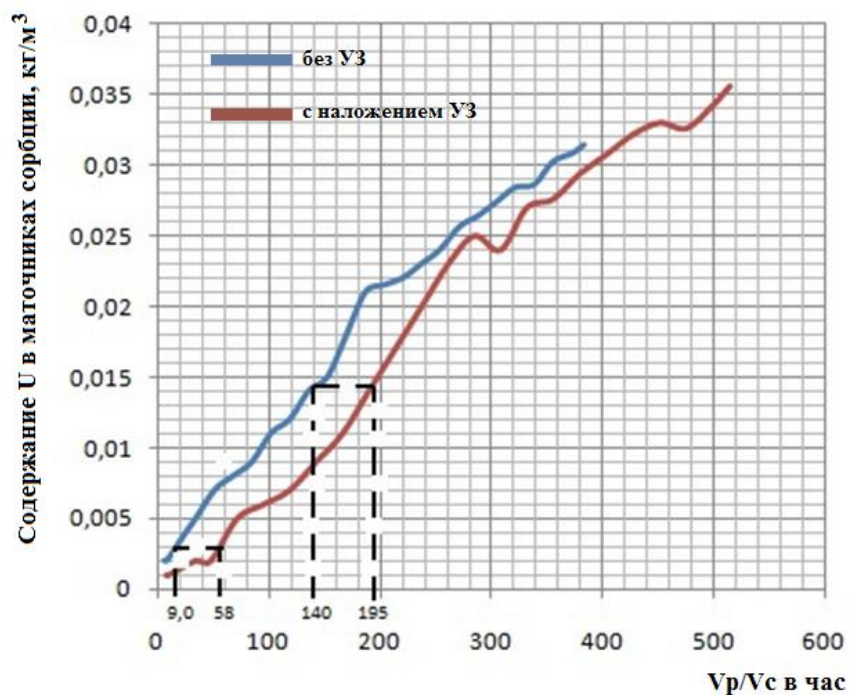


Fig. 4. Graphs of uranium sorption by the ion exchanger with and without ultrasonic action

Полученные результаты указывают на оптимальное для сорбции без ультразвука отношение объема подаваемого ПР к объему смолы, равное $5,86 V_p/V_c$ в час.

Полученные в первом опыте скорости сорбции для колонны без ультразвука и с ультразвуком были взяты за основу при проведении последующего эксперимента по определению полной динамической обменной емкости (ПДОЕ) смолы без использования ультразвука и с наложением ультразвука. Результаты опытов по определению ПДОЕ ионита с использованием ультразвука и без использования ультразвука приведены в табл. 5.

Графики сорбции урана в динамических условиях при проведении эксперимента представлены на рис. 4.

Получены следующие результаты экспериментов по интенсификации процесса сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу наложением ультразвука, в частности УЗ-интенсификация позволяет:

– при содержании урана в маточниках сорбции $0,003 \text{ г/м}^3$ увеличить скорость сорбции в 6,4 раза;

– при содержании урана в маточниках сорбции $0,014 \text{ г/м}^3$ увеличить скорость сорбции в 1,4 раза;

– за счет применения УЗ-воздействия получить средневзвешенное увеличение скорости сорбции в 1,3 раза;

– увеличить ПДОЕ ионита по урану в 1,13 раза.

Общее время обработки ультразвуком при проведении экспериментов составило 63,3 ч.

В процессе проведения экспериментов была определена максимальная скорость сорбции без применения ультразвука для используемой на руднике ионообменной смолы, равная $5,86 V_p/V_c$ в час.

4. Испытания по определению влияния ультразвука на механическую прочность ионита

Испытания использованного во всех опытах анионита марки Ambersep 920U SO₄ проводились в емкости из полимерного материала объемом 60 дм³, в которую загрузили 40 дм³ ионообменной смолы. Паспортные характеристики анионита приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики сильноосновной макропористой анионообменной смолы марки Ambersep 920U SO₄ производства Dow Chemical Company

Characteristics of the strongly basic macroporous anion exchange resin of Ambersep 920U SO₄ grade manufactured by Dow Chemical Company

Показатель	Значение
Полимерная матрица	Макропористый сшитый полистирол
Физическая форма	Непрозрачные гранулы
Ионная форма при поставке	Сульфатная (не менее 50 %)
Функциональная группа	-N+(CH ₃) ₂ CH ₂ CH ₂ OH
Полная ионообменная емкость	≥ 1,0 г-экв./дм ³ (Cl ⁻ -форма)
Влагосодержание	53–65 % (Cl ⁻ -форма)
Товарная масса	680–710 г/дм ³
Гармонический средний диаметр	0,845–1,050 мм
Коэффициент однородности	≤ 1,50
Содержание мелких гранул <0,710 мм	макс. 5,0 %
Содержание крупных гранул >1,180 мм	макс. 4,0 %
Максимальное обратимое набухание Cl ⁻ → SO ₄ ²⁻	около 5 %
Механическая прочность	≥ 98 %
Завод-изготовитель	Rohm and Haas France S.A.S. (Dow Chemical Company)
Страна-производитель	Франция

На верхнюю часть емкости (крышку) установили УЗ-агрегат и шланг для подачи проточной технической воды. Рабочий орган (УЗ-излучатель) был помещен соосно внутри цилиндрической емкости. Габариты рабочего органа излучателя: длина – 480 мм, диаметр – 50 мм. Высота емкости – 640 мм, диаметр емкости – 360 мм. Ионит располагался между рабочим органом излучателя и стенками емкости. Расстояние от стенок емкости до рабочего органа излучателя составляло 335 мм.

Данный режим обработки является жестким, так как звуковая волна не успевает погасить свою мощность в гетерогенной среде (раствор + ионит) и за счет малого расстояния между источником и стенкой емкости

образуется отраженная волна. Наличие отраженных волн приводит к образованию зон кратного увеличения воздействия ультразвука на ионит. При работе в промышленных сорбционных колоннах (и в других ионообменных аппаратах потокового типа) данный эффект будет отсутствовать. Максимальная зона влияния ультразвука для данного типа излучателей составляет 550–600 мм от поверхности излучателя. Объемный расход воды составил 20 дм³/ч. Режим работы УЗ-генератора установили как 6 к 25, т.е. 6 ч работы ультразвука и 25 мин остановки. Общее время работы УЗ-излучателя в рамках эксперимента составило 148 ч на частоте 22 кГц. Общий вид установки в сборе показан на рис. 5.



Рис. 5. Установка для исследования воздействия жесткого ультразвука на механическую прочность ионита

Fig. 5. Installation for the study of hard ultrasound on the ion exchanger grain mechanical strength

Перед началом эксперимента были отобраны пробы исходной (новой) смолы и промаркированы соответственно № 3 и № 4 (рис. 6). По окончании эксперимента были отобраны пробы смолы, прошедшей УЗ-обработку, они были промаркированы № 1 и № 2. На рис. 6 видно, что пробы № 3 и № 4 – это новая смола, только что из заводской упаковки, а пробы № 1 и № 2 отличаются более темным цветом с серым оттенком, свидетельствующим об их предварительной эксплуатации.

Все пробы были отправлены на так называемый слепой анализ в независимую

специализированную лабораторию. Результаты анализа данных проб на определение величины механической прочности зерен ионита таковы:

- проба № 1: механическая прочность – 99,0 %;
- проба № 2: механическая прочность – 99,5 %;
- проба № 3: механическая прочность – 98,0 %;
- проба № 4: механическая прочность – 98,0 %.



Рис. 6. Пробы исходного нового ионита (№ 3 и 4) в сравнении с пробами ионита, бывшего в эксплуатации (№ 1 и 2)

Fig. 6. Samples of the initial new ion exchanger (Nos. 3 and 4) in comparison with the samples of the previously used ion exchanger (Nos. 1 and 2)

Как видно из полученных данных, обработка зерен ионообменной смолы ультразвуком даже в специально смоделированных жестких условиях не только не вызвала ухудшения ее механической прочности, более того, она привела пусть к незначительному, но вполне диагностируемому и заметному их упрочнению. Это произошло за счет полной УЗ-очистки макропористой структуры зерен ионита, а также за счет восстановительного эффекта так называемой УЗ-сшивки (спайки) нитей полистирольной матрицы, поврежденных в ходе эксплуатации ионообменной смолы при ее использовании в технологическом цикле получения урана методом ПСВ.

Заключение

Проведенные эксперименты по интенсификации сорбции урана из продуктивных растворов на ионообменную смолу ультразвуком

показали принципиальную возможность перспективного использования УЗ-воздействия для интенсификации других ионообменных процессов в технологическом цикле получения урана методом ПСВ. Также опытным путем был установлен факт отсутствия негативного влияния даже продолжительного и жесткого УЗ-воздействия на механическую прочность зерен ионообменной смолы. Наблюдался регенеративный эффект.

Описанные в настоящей статье проведенные эксперименты охватывают только процесс сорбции урана из продуктивных растворов. Однако можно предполагать, что исследование УЗ-воздействия является перспективным для других ионообменных процессов, применяемых при производстве урана методом ПСВ.

Библиографический список

1. Агранат Б. А. *Ультразвуковая технология*. М.: Металлургия; 1974, 503 с.
2. Казанцев В. Ф. *Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок*. М.: Машиностроение; 1980.
3. Кардашов Г. А., Михайлов П. Е. *Тепломассообменные акустические процессы и аппараты*. М.: Машиностроение; 1976.
4. Колесников Г. Е., Карпенко Л. А. *Оптимальное проектирование в задачах химического машиностроения*. М.: МИХМ; 1983.
5. Ламекин Н. С. Математическая модель диспергирования с учетом кавитации. *Теоретические основы химических технологий*; 1987. Т. 21.
6. Маргулис М. А. *Звукохимические реакции и сонолюминесценция*. М.: Химия; 1986.
7. Николаев В. Н., Шевцов В. С., Гогом Т. А. *Исследование влияния ультразвука на процесс разделения иловой смеси*. Сб. науч. тр. М.: МИСИ; 1984.

8. Промтов М. А. *Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества*. М.: Машиностроение; 2004.
9. Пьезокерамические преобразователи. *Методы измерения и расчета параметров*: Справочник. Под ред. С. И. Пугачева. Л.: Судостроение; 1984.
10. Розенберг Л. Д. *Источники мощного ультразвука. Фокусирующие излучатели ультразвука*. М.: Наука; 1967.
11. Тананаев И. Г. *Уран: Учеб. пособие для вузов*. М.: Изд-во НИЯУ «МИФИ»; 2011.
12. Теумин И. И. *Ультразвуковые колебательные системы*. М.: ГНТИ машиностр. лит.; 1959.
13. *Технологический регламент на рабочий процесс переработки растворов подземного выщелачивания с получением готовой продукции в виде оксидов природного урана на руднике ПСВ*. 2015.
14. Фридман В. М. Физико-химическое действие ультразвука на гетерогенные процессы жидкостной обработки материалов. *Применение ультразвука в химико-технологических процессах*. М.; 1960.
15. Цыганков Ф. П., Сенин В. Н. *Циклические процессы в химической технологии. Основы безотходных производств*. М.: Химия; 1988.
16. Datta Subhendu K., Shah Arvind H. *Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. CRC Press LLC; 2019. 321 p.
17. David J., Cheeke N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press; 2002. 451 p.
18. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*. Springer Japan; 2017. 382 p.
19. Kundu T. *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*. Springer International Publishing; 2019. 759 p.
20. Seak T., Leong H., Manickam S., Gregory J. O. Martin, Wu Li, Muthupandian A. *Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications*. Springer International Publishing; 2018. 446 p.
21. Wayne W. *Ultrasonic welding of lithium (Li) ion batteries*. ASME Press; 2017. 268 p.
22. Wilbur L. Bunch. *The effect of ultrasonic sound frequencies on the viscosity of Wyoming asphalt base petroleum*. Laramie, Wyoming; 1951. UMI Number: EP23601. 47 p.

References

1. Agranat B. A. *Ultrasonic Technology*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1974. 503 p. (In Russ.).
2. Kazantsev V. F. *Calculation of ultrasonic transducers for technological*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1980. (In Russ.).
3. Kardashov G. A., Mikhailov P.E. *Heat and mass transfer acoustic processes and apparatuses*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1976. (In Russ.).
4. Kolesnikov G. E., Karpenko L.A. *Optimal design in the problems of chemical engineering*. Moscow: MIHM Publ.; 1983. (In Russ.).
5. Lamekin N. S. Dispergating mathematical model taking into account cavitation. *Theoretical Foundations of Chemical Technologies*; 1987. Vol. 21. (In Russ.).
6. Margulis M. A. Sonochemical reactions and sonoluminescence. Moscow: Khimiya Publ.; 1986 (In Russ.).
7. Nikolaev V. N., Shevtsov B.S., Gogom T.A. *Investigation of ultrasound action on the process of mixed liquor separation*. MISI Proceedings. Moscow: MISI Publ.; 1984. (In Russ.).
8. Promtov M. A. *Equipment and apparatuses with pulsed energy actions on the substances to be treated*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2004. (In Russ.).
9. Pugachev S. I. (ed.) Piezoceramic transducers. *Methods of measurement and calculation of parameters: Handbook*. Leningrad: Sudostroenie Publ.; 1984. (In Russ.).
10. Rosenberg L. D. *Sources of hard ultrasound. Focusing ultrasound emitters*. Moscow: Nauka Publ., 1967. (In Russ.).
11. Tananaev I. G. *Uranium: manual for graduate students*. Moscow: Publishing House of NRNU "MIPhI Publ."; 2011. (In Russ.).
12. Teumin I. I. Ultrasonic oscillatory systems. Moscow: GNTI of Machine-Building Literature Publ., 1959. (In Russ.).
13. *The standard operating procedure for processing ISR pregnant solutions to produce finished products in the form of natural uranium oxides at ISR mine*. 2015. (In Russ.).
14. Friedman V. M. Physico-chemical effect of ultrasound on heterogeneous processes of hydronic treatment of materials. *Application of ultrasound in chemical technology processes*. Moscow; 1960. (In Russ.).
15. Tsygankov F. P., Senin V. N. *Cyclic processes in chemical technology. Basics of non-waste production*. Khimiya Publ.; 1988. (In Russ.).
16. Datta Subhendu K., Shah Arvind H. *Elastic Waves in Composite Media and Structures: With Applications to Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. CRC Press LLC; 2019. 321 p.

17. David J., Cheeke N. *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*. CRC Press; 2002. 451 p.
18. Hirao M., Ogi H. *Electromagnetic Acoustic Transducers: Noncontacting Ultrasonic Measurements using EMATs*. Springer Japan; 2017. 382 p.
19. Kundu T. *Nonlinear Ultrasonic and Vibro-Acoustical Techniques for Nondestructive Evaluation*. Springer International Publishing; 2019. 759 p.
20. Seak T., Leong H., Manickam S., Gregory J. O. Martin, Wu Li, Muthupandian A. *Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in Drug and Food Applications*. Springer International Publishing; 2018. 446 p.
21. Wayne W. *Ultrasonic welding of lithium (Li⁺) ion batteries*. ASME Press; 2017. 268 p.
22. Wilbur L. Bunch. *The effect of ultrasonic sound frequencies on the viscosity of Wyoming asphalt base petroleum*. Laramie, Wyoming; 1951. UMI Number: EP23601. 47 p.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-25-29

Selective Extraction of Cobalt and Copper from Chilean Mine Water by Ion Exchange Resin

J. Abeywickrama, N. Hoth, M. Ussath, C. Drebenstedt

Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany

Abstract: Heavy metal-containing waste has become one of heavy environmental problems. Processing of such waste accumulated at waste dumps to extract valuable components is commercially beneficial activity and, in addition, decreases environmental impact. In this study, Lewatit MonoPlus TP 207 (TP 207) ion exchange resin was evaluated for its suitability for selective removal of cobalt (Co) and copper (Cu) from mine waste waters, generated by heap leaching waste materials at a Chilean copper mine. In series of laboratory scale fixed-bed ion exchange column tests, the effects of process parameters, such as waste water flow rate and regenerant (sulfuric acid) concentration, were studied in both waste water treatment by the ion exchange resin process and the resin regeneration (metals eluting) process. The regeneration process tests were performed using 1 % and 10 % sulfuric acid. The best separation of the metals (in the eluting process) was achieved with regeneration of TP 207 resin using 1 % sulfuric acid at flow rate of 1 bed volume per hour (BV/h).

Keywords: heavy metal-containing waste; ion exchange resin; fix-bed columns; adsorption/desorption; regeneration/elution; eluate; selective extraction.

For citation: Abeywickrama J., Hoth N., Ussath M., Drebenstedt C. Selective extraction of cobalt and copper from Chilean mine water by ion exchange resin. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):25-29. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-25-29.

1. Introduction

Copper is a metal of choice for technologists and important metal with wide range of industrial applications such as plumbing, electroplating, manufacture of wires/cables for various industries, building, machine building, etc. [5]. Chile is the main copper producer in the world, which satisfies more than 30 % of the world supply [4]. For the latest century, in El Salvador mining district, tailings were disposed not only around mine pits [3], but also over the shore [7]. This has resulted in formation of large tailings deposits in this area [9]. With time, these tailings have been exposed to atmosphere action that resulted in weathering, oxidation, and formation of 1–2 m thick low-pH (2.6–4) oxidation zone in upper layer of the tailings. Atmospheric leaching of the zone material results in leaching of bivalent metal cations, such as Cu^{2+} , Ni^{2+} , and Zn^{2+} in concentrations up to 2265 mg/l, 18.1 mg/l, and 20.3 mg/l,

respectively, in the mine tailings drainage waters [7]. This is very dangerous situation because these heavy metal concentrations are much above the approved maximum concentration limits.

During past decades, many methods have been implemented to remove heavy metals from the drainage waters. Among many classical and modern techniques, ion exchange method has unique advantages such as high metal recovery rate, ion selectivity, lesser slurry generation, the meeting strict discharge environmental specifications, etc [1]. Modern ion exchange resins are produced from synthetic polymer substances such as styrene-divinyl-benzene copolymers [6]. Synthetic ion exchange resins have relatively large pores, that facilitates the exchange process [8].

Thus, the purpose of this study is to test modern ion-selective ion exchange resins for selective removal and separation of heavy metals from mine drainage water generated from Chilean



heap leaching residuals. Correct selective extraction of these metals may be profitable for the mine due to minimizing remediation costs and decreasing environmental impact (and, thus, environmental payments/fines). Among other valuable metals in these leaching residuals, cobalt should be highlighted, whose price has significantly increased over the latest several years [2]. This study will be specially focused on separation of cobalt from copper when extracting from the mine drainage waters.

2. Experimental research

The material used to generate mine water in this study was collected from heap-leached stockpile at a Chilean copper open pit. This material was mixed with double-distilled water, and the mixture was stirred several times for three days to produce final water for the testing. The ion exchange column unit comprised polyvinylchloride (PVC) column 2.5 cm in diameter and 12 cm high connected with peristaltic pump. A bed volume (BV) was 10 ml and it was injected into the material of initial wet ion exchange resin loaded into the column. All fittings and pipework were made of polyethylene. The mine drainage water was pumped into the column in up-flow direction by the peristaltic pump at controlled flow rates (1 BV/h = 10 ml/h; 6 BV/h = 60 ml/h). The water was sampled at the column outlet at regular time intervals and was analyzed for cations using MP-AES method. After the water treatment (adsorption) cycle, the columns were regenerated (for eluting the metals) by either 1 or 10 % (w/w) sulfuric acid solution. These concentration ranges were chosen based on the resin product specification provided by LANXESS. The backwash and regeneration were performed by sulfuric acid solution, which was pumped from bottom to top into the column at flow rate of either 1 BV/h or 6 BV/h.

3. Findings and Discussion

3.1. Tests on metal sorption on TP 207 ion exchange resin column

Fig. 1, *a* shows the curves of copper and cobalt concentrations in contact with TP 207 resin at flow rate of 10 ml/h (1 BV/h). Initial increasing of cobalt concentration was observed at around 70 BV and achieved peak value of 28.8 mg/l at 137 BV. Then the concentration of cobalt decreased and reached the initial concentration at 228 BV. Thereafter the concentration fluctuated around the initial value. Cobalt was adsorbed between 0 – 70 BV and then desorbed until the end of the process. The test continued overnight. Therefore, no samples were taken in interval between 85 – 130 bed volumes. Copper concentration growth started at 160 BV and reached peak at 225 BV. Afterwards copper concentration fluctuated around the initial level. This test lasted 12 days to reach completing copper sorption. Fig. 1, *b* shows similar curves for copper and cobalt concentrations in contact with TP 207 ion exchange resin at flow rate of 60 ml/h (6 BV/h). The test continued overnight, and no samples were taken in interval between 48 – 129 BV. Initial increasing of cobalt concentration was observed at about 45 BV, and peak value was achieved at around 115 BV. After 129 BV cobalt was desorbed from the resin. After 195 BV the flow was stopped for twelve hours. After the interruption (at 197 BV), significantly higher cobalt concentration (32.7 mg/l) was observed. Copper concentration growth started at about 115 BV, and then copper was desorbed from the column up to reaching peak concentration at 225 – 240 BV. Notice that during the flow interruption for twelve hours at about 197 BV, copper concentration dropped from 101.7 mg/l to 49.8 mg/l. The resin could adsorb 417.5 mg of copper during the test process.

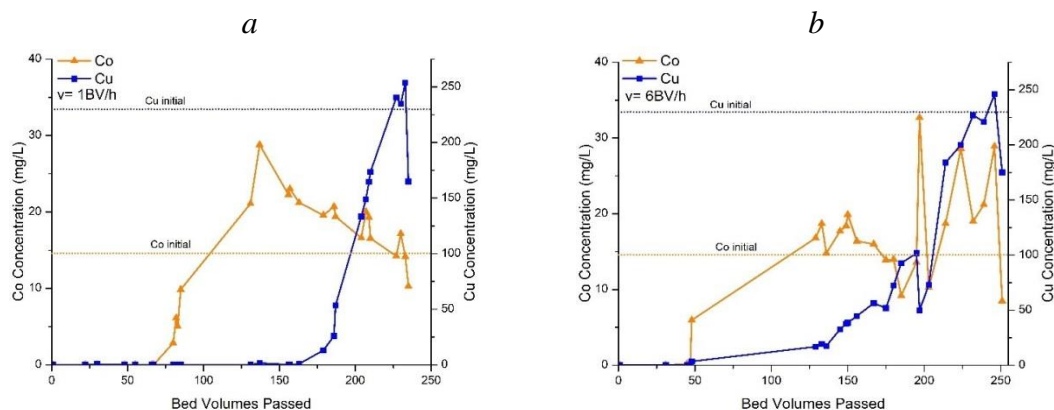


Fig. 1. Curves of cobalt and copper concentrations in contact with TP 207 ion exchange resin:
a – flow rate = 10 ml/h (1 BV/h); *b* – flow rate 60 ml/h (6 BV/h)

3.2 Column TP 207 ion exchange resin regeneration (metal elution) tests

Fig. 2, *a* shows the column TP 207 ion exchange resin regeneration (using metal leaching (eluting) by 10 % sulfuric acid at flow rate of 1 BV/h) tests curves of copper and cobalt concentrations (for the resin taken after 120 BV). Intensive eluting both copper and cobalt started at 1 BV. Cobalt peak concentration of 533 mg/l was achieved at about 1.5 BV, which was the highest cobalt concentration achieved throughout this study. Copper peak concentration of 12,345 mg/l was achieved at about 2 BV. After that concentrations of both ions drastically decreased. At 2.5 BV the copper and cobalt concentration decreased to 4,903 mg/l and 60.2 mg/l, respectively. By that time, few small air bubbles near the bottom of the column were observed. Moreover, one side of the column was poorly regenerated. Starting from 3 BV, the copper and cobalt concentrations decline continued, but at lesser gradient. The copper concentration dropped below 50 mg/l after 7 BV. The cobalt concentration dropped below 15 mg/l (below detection limit of the MP-AES) after 5 BV. The tests recovered 309 mg of copper and 7.17 mg of cobalt during the resin regeneration (metal leaching) process. About 88% of the adsorbed cobalt were eluted within interval 0-3 BV. At the same time, both copper and cobalt were eluted in the same range of bed volumes. Therefore, no

metal selection was achieved during the regeneration/leaching (eluting) tests.

Fig. 2, *b* shows the column TP 207 ion exchange resin regeneration (using metal leaching by 1 % sulfuric acid at flow rate of 1BV/h) tests curves of copper and cobalt concentrations (for the resin taken after 120 BV). Intensive eluting cobalt started at 1 BV. Cobalt peak concentration of 328 mg/l was achieved at about 2 BV. Then the concentration dropped drastically to 47.6 mg/l at 4 BV. At 4 BV the regeneration process was interrupted for 12 hours. At 5 BV the cobalt concentration slightly increased, up to 62 mg/l and then dropped again to below 15 mg/l at 6 BV.

Intensive eluting copper started at 2 BV, and peak copper concentration of 4,132 mg/l was achieved at about 4 BV. Then the copper concentration drastically decreased to 2160 mg/l by 5 BV. Then, after the process interruption at 4 BV, the elution nature changed. The copper concentration started to grow again and achieved peak value of 3,247 mg/l at 7 BV. Thereafter the concentration gradually decreased and to below 100 mg/l after 16 BV. About 76.6 % of the adsorbed copper (288 mg) and 56 % of the adsorbed cobalt (7 mg) were eluted (leached) from the resin. Thus, the metals concentration curves at 1 % sulfuric acid showed marked selective elution of cobalt and copper.

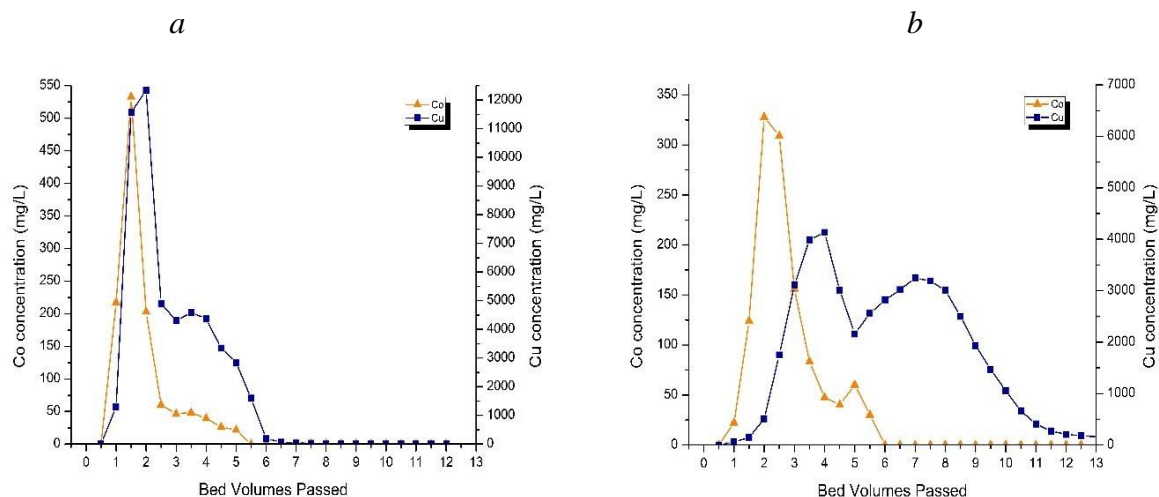


Fig. 2. Column TP 207 ion exchange resin regeneration tests – cobalt and copper eluting (leaching) curves:

a – by 10 % sulfuric acid; *b* – by 1 % sulfuric acid

4. Conclusion

The performed tests and analysis showed that the Lewatit MonoPlus TP 207 (amino-di-acetic) ion exchange resin is suitable for selective extraction of copper and cobalt from waste water drainage generated by heap leaching waste material at the Chilean copper mine (open pit). Since the test feed solution (the waste water) has higher concentration of copper ions, it is very important to have higher amount of cobalt adsorbed by the resin during the water treatment process to achieve better elution as well as better separation of the metals in the resin regeneration (metal elution) process. Maximum adsorption of cobalt ions by the resins can be achieved by treatment the waste water until the column resin saturation (with cobalt) point. Further continuation of the treatment process results in desorbing the previously adsorbed cobalt ions due to the presence of better absorbable ions such as copper and zinc in the feed solution (the waste water). The treatment

at higher flow rate (6 BV/h) results in earlier resin saturation with cobalt and its following greater desorption (as lesser absorbable ion). On the other hand, with the treatment at lower flow rate (1 BV/h) required more bed volumes before the resin saturation achieved and also resulted in sharp desorption curve. The best way for separation of copper and cobalt is using 1 % sulfuric acid as the resin regenerating solution (for eluting cobalt and copper). Increasing the sulfuric acid concentration lowers the elution process selectivity and, thus, the degree of the metals separation, as well as increases cobalt and copper concentrations in the eluate at lower flow rate (BV) values. Under the examined conditions, the tested ion exchange resin is capable to reduce the copper to cobalt ratio from 15 : 1 (feed waste water) to 8 : 1 during the resin regeneration process.

It is difficult to compare the results of this study with available literature data due to uniqueness of the studied mine waste water.

References

1. Abo-Farha S. A., Abdel-Aal A. Y., Ashour I. A., Garamon S. E. Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100. *Journal of hazardous materials*. 2009;169(1-3):190-194.
2. Beardsmore T. J. *Western Australia: a battery metal powerhouse*. 2018.
3. Castilla J. C., Correa J. A. Copper tailing impacts in coastal ecosystems of northern Chile: from species to community responses. Moore M., Imray P., Dameron C., Callan P., Langley A., Mangas S. (eds.), *Copper. National Environmental Health Forum Monographs, Metal Series*. 1997;(3):81-92.
4. Correa J. A., Castilla J. C., Ramírez M., Varas M., Lagos N., Vergara S., Brown M. T. (1999). Copper, copper mine tailings and their effect on marine algae in northern Chile. In: *Sixteenth International*

Seaweed Symposium. Springer, Dordrecht. P. 571-581

5. Das S. *Batch study removal of copper ions from water by using ion exchange resin*. Doctoral dissertation. 2014.

6. Demirbas A. Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: a review. *Journal of hazardous materials*. 2008;157(2-3):220-229.

7. Dold B. Element flows associated with marine shore mine tailings deposits. *Environmental science & technology*, 2006;40(3):752-758.

8. Elshazly A. H., Konsowa, A. H. Removal of nickel ions from wastewater using a cation-exchange resin in a batch-stirred tank reactor. *Desalination*. 2003;158(1-3):189-193.

9. Lee M. R., Correa J. A. An assessment of the impact of copper mine tailings disposal on meiofaunal assemblages using microcosm bioassays. *Marine environmental research*. 2007;64(1):1-20.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38

Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений

Ловчиков А. В.

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, Апатиты, Россия

Аннотация: В горнотехнической литературе до сих пор превалирует представление о том, что горные удары в рудниках и шахтах вызываются гравитационными силами веса массива покрывающих пород, выдвинутое в прошлом веке С.Г. Авершиным и И.М. Петуховым. На этом представлении основываются правила безопасного ведения горных работ на удароопасных месторождениях, в том числе современные инструктивные документы Ростехнадзора. Многочисленные исследования свойств поведения массива горных пород как геологической среды, явлений, вызывающих горные удары в подземных выработках, механизмов проявления горных и горно-тектонических ударов изменяют многие представления. Они оказались в настоящее время настоятельно необходимыми для объяснения причин особо мощных геодинамических явлений в рудниках – горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений – явлений, которые в прошлом веке практически не наблюдались. Сильные геодинамические события в рудниках (горно-тектонические удары, техногенные землетрясения), сопоставимые по энергетическому уровню с землетрясениями, в очередной раз показали аналогию этих явлений с естественными землетрясениями, исследованиями которых занимается сейсмология. М.А. Садовским с соавторами был установлен закон самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях. На основании этого закона соотношения, установленные для очагов землетрясений, оказалось возможным применять для динамических проявлений горного давления в рудниках. В настоящей работе развиваются дальнейшие детали этой аналогии. В ней показано, каким размерам структурной неоднородности массива соответствуют те или иные формы динамических проявлений горного давления. На основании закона самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях показано, что энергетические характеристики проявлений горного давления в рудниках подчиняются закономерностям, установленным в сейсмологии.

Ключевые слова: горно-тектонический удар, массив, структурные неоднородности, классификация, сейсмический момент, модуль сдвига.

Благодарности: работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-05-00563а.

Для цитирования: Ловчиков А. В. Новая концепция механизма горно-тектонических ударов и других динамических явлений для условий рудных месторождений. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):30-38. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.

A New Concept of the Mechanism of Rock-Tectonic Bursts and Other Dynamic Phenomena in Conditions of Ore Deposits

A. V. Lovchikov

Mining Institute, Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: In mining technical literature, the prevailing idea is still that rockbursts in open pits and underground mines are caused by gravitational forces produced by the overburden rock mass, put forward in the 20th century by S.G. Avershin and I.M. Petukhov. This concept is the basis for the rules of safe mining at rockburst-hazardous deposits, including modern guidance documents of Rostekhnadzor. Numerous studies of the behavior of a rock mass as a geological medium, the phenomena causing rockbursts in underground workings, the mechanisms of manifestation of rockbursts and rock-tectonic bursts change many ideas. They have now become urgently needed to explain the causes of particularly powerful geodynamic phenomena in mines – rock-tectonic bursts, technogenic earthquakes – phenomena that were practically not observed in the 20th century. Intense geodynamic events in mines (rock-tectonic bursts, technogenic earthquakes), comparable in energy level to natural earthquakes, have once again shown their analogy with natural earthquakes to be studied by seismology. M.A. Sadovsky et al. established the law of self-similarity of seismic process at different scale levels. Based on this law, the relationships



established for seismic focuses proved to be applicable to dynamic manifestations of rock pressure at mines. In this paper, further details of this analogy are developed. It shows which forms of dynamic manifestations of rock pressure correspond to which sizes of structural heterogeneity of rock mass. Based on the law of self-similarity of seismic processes at different scale levels, we showed that the energy characteristics of the rock pressure manifestations at mines obey the laws established in seismology.

Keywords: rock-tectonic burst, rock mass, structural heterogeneities, classification, seismic moment, shear modulus.

Acknowledgments: the study has been performed with support of the Russian Foundation for Basic Research, project №18-05-00563a.

For citation: Lovchikov A. V. A new concept of the mechanism of rock-tectonic bursts and other dynamic phenomena in conditions of ore deposits. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):30-38. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-30-38.

Введение

Горно-тектонический удар – это мгновенное разрушение массива большой мощности по тектоническому нарушению или по вновь образовавшейся под влиянием горных работ трещине, вызывающее разрушение целиков и выработок, как правило, на больших площадях. Новая концепция заключается в том, что мгновенное разрушение пород при ударе происходит из-за концентрации вокруг горных выработок гравитационно-тектонических напряжений, существующих в земной коре, вследствие современных горообразовательных процессов. Под влиянием масштабных горных работ структурно-блоковая среда горных массивов из-за концентрации гравитационно-тектонических напряжений резко переходит в новое положение геодинамического равновесия в форме горных, горно-тектонических ударов и техногенных землетрясений.

Теория вопроса

В основе концепции лежит различие в условиях естественного напряженного состояния массивов рудных и нерудных (осадочного происхождения) месторождений полезных ископаемых. В массивах рудных месторождений магматического или метаморфического происхождения имеет место гравитационно-тектоническое напряженное состояние пород, при котором вследствие современных горообразовательных процессов, происходящих в земной коре, преобладающими по величине

являются горизонтальные напряжения, а вертикальные гравитационные напряжения, обусловленные силами веса толщ покрывающих пород, имеют второстепенное значение. В массивах месторождений осадочного происхождения (угольных, солевых) в силу относительно слабых деформационно-прочностных свойств пород и длительных реологических процессов имеет место гравитационное напряженное состояние пород, в котором определяющее значение имеет вертикальная гравитационная составляющая напряжений, обусловленная силами веса толщи налегающих пород.

Между тем в современной российской горно-технической литературе закрепилось и господствует представление о том, что горные и горно-тектонические удары в рудниках вызываются гравитационными силами веса толщ покрывающих пород над подземными горными выработками. Теоретическое обоснование этих представлений приведено в работах С. Г. Авершина [1], И.М. Петухова с соавторами [2, 3] и др. Положения о гравитационной природе сил, вызывающих горные удары в рудниках, заложены в современных инструктивных документах Ростехнадзора [4], лимитирующих правила ведения горных работ на удароопасных рудных месторождениях. В инструкции [4] нет даже упоминания о тектонических напряжениях, существующих в массивах. Вследствие этого некоторые положения инструкции [4] являются ошибочными и недоверенными.

Другой основой концепции является представление о горных массивах как геологической среде иерархически-блочного строения, основы которого заложены академиком М. А. Садовским. В соответствии с этими представлениями горные массивы представляют собой иерархию геолого-структурных блоков, как бы вложенных друг в друга и разделенных междублоковыми промежутками – разрывными нарушениями и трещинами различного структурного уровня. Существует множество классификаций структурной нарушенности горных массивов, но, по нашему мнению, наиболее удачной для скальных массивов является классификация структурных нарушений массивов, принятая для оснований гидротехнических сооружений [5]. Указанная классификация наиболее правомерна для массивов рудных месторождений по крайней мере по двум причинам:

а) основания гидротехнических сооружений по масштабам протяженности в горизонтальной и вертикальной плоскостях (сотни метров, первые километры) сходны с размерами шахтных полей рудников, которые имеют аналогичные размеры и, следовательно, схожи по размерам с пересекаемыми структурными неоднородностями (трещинами, тектоническими нарушениями, разломами);

б) классификация разработана для массивов скальных, т. е. весьма прочных, пород магматического или метаморфического происхождения.

Поскольку разрывным структурам различного масштаба должны соответствовать блоковые структуры соответствующего масштаба, нами предложена следующая классификация блоковых структур для шахтных полей рудников, основанная на приведенной выше классификации структурных нарушений в гидротехническом строительстве (табл. 1) [6].

Динамические проявления горного давления в горных выработках (горные, горно-тектонические удары и другие проявления) можно рассматривать как ответную реакцию геологической среды на техногенное вмешательство. Эта реакция зависит от многих факторов, и прежде всего от масштабов техногенного воздействия, структурно-блоковой неоднородности массивов, свойств пород, естественного напряженного состояния массивов и других факторов. Зависимость форм проявлений горного давления от размеров горных выработок при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов приведена на рис. 1.

Таблица 1

Классификация блоковых структур, образуемых разрывными нарушениями

Classification of block structures formed by faults

Наименование блоковой структуры	Ранг (порядок) нарушений, ограничивающих блок, и блоковых структур	Протяженность нарушений, ограничивающих блок	Средний поперечный размер блока
Тектонический блок	I	Сотни и тысячи километров	500 – 1000 км
Региональный геолого-структурный блок	II	Десятки и сотни километров	50 – 100 км
	III	Единицы и первые десятки километров	5 – 10 км
Локальный геолого-структурный блок	IV	Сотни и первые тысячи метров	500 – 1000 м
	V	> 10 м	50 – 100 м
Трещинно-блоковая отдельность	VI	1 – 10 м	5 м
	VII – VIII	< 1 м	< 1 м

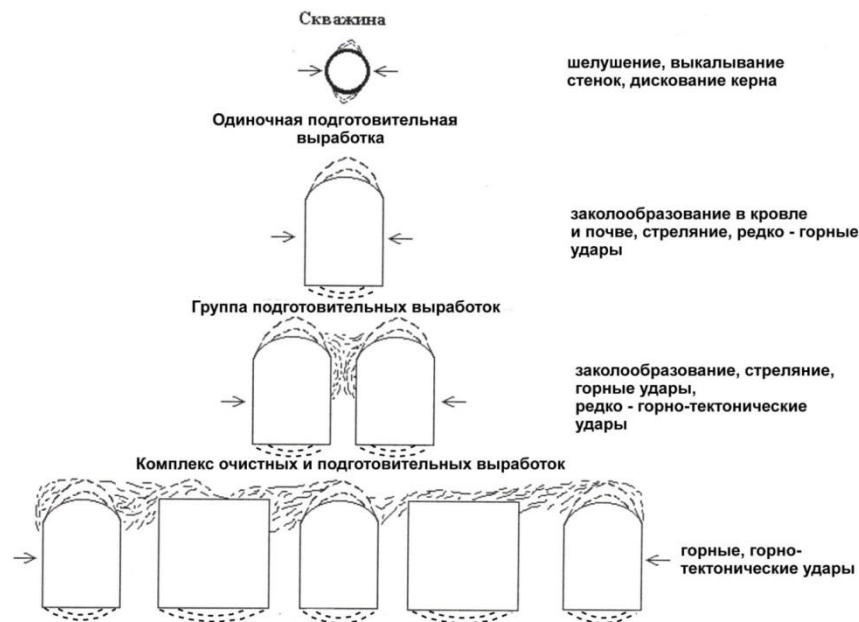


Рис. 1. Схема развития форм динамических проявлений горного давления с ростом масштабов горных работ при гравитационно-тектоническом напряженном состоянии массивов

Fig. 1. Model of development of rock pressure dynamic manifestation forms with increasing scale of mining operations in conditions of gravitational-tectonic stress state of rock masses

Таблица 2

Формы экстремальных динамических проявлений горного давления, соответствующие масштабам активизированных горными работами геологических структур

Forms of extreme dynamic manifestations of rock pressure corresponding to the scale of geological structures activated by mining

Ранг (порядок) геологической структуры	Масштаб горных работ (выработка), активизирующих структуру	Характерный размер выработок, м	Форма динамических проявлений горного давления
VII – VIII	Шпур, скважина	$10^0 – 10^1$	Шелушение, выкалывание стенок, дискование керна
VI	Одиночная выработка, двоянная выработка	$10^2 – 10^3$	Стреляние, заколообразование, горный удар
V – IV	Комплексы подготовительных и очистных выработок	$10^4 – 10^6$	Горный, горно-тектонический удар, техногенное землетрясение

Классификация (см. табл. 1) позволяет ориентироваться в принадлежности по масштабу (рангу, порядку) структурно-блоковой неоднородности горных массивов в соответствии с размерами блоков и ограничивающих их тектонических нарушений. В соответствии с классификацией (см. табл. 1) можно ориентировочно оценивать ранг геологических структур, активизированных горными работами соответствующего размера, вызывающих те или иные формы динамических проявлений горного давления (табл. 2).

Таким образом, предложенная классификация структурно-блоковой неоднородно-

сти массивов позволяет проводить ранжирование блоков наиболее распространенных размеров для рудников. Она помогает практически реализовать концепцию М.А. Садовского о модели иерархически-блочной геологической среды применительно к проблемам эксплуатации рудников.

Анализ материалов. Развитие теории

Любые динамические проявления горного давления – это подвижки геологической среды в новое положение геодинамического равновесия под влиянием горных выработок и существующих в этой среде напряжений. Величина подвижки зависит от размеров горных

выработок в массиве, напряженного состояния пород, размеров геолого-структурной (блоковой) неоднородности массивов и других факторов. В прошлом, XX веке, обращали мало внимания на аналогию горных ударов и сейсмических явлений в земной коре, поскольку горные удары в рудниках и шахтах России имели относительно невысокий энергетический уровень [7]. И только в конце прошлого века – начале нынешнего столетия, когда в рудниках России, ЮАР, Польши и других стран стали проявляться сильные горно-тектонические удары с выделенной сейсмической энергией порядка $E = 10^{10}$ Дж, аналогия этих явлений с землетрясениями была установлена [8, 9, 10].

Для характеристики энергии землетрясений в сейсмологии и шахтной сейсмичности используется понятие сейсмического момента в очаге [9]:

$$M_0 = GS\delta, \quad (1)$$

где M_0 – сейсмический момент, Н·м; G – модуль сдвига пород массива, МПа; S – площадь разрыва, м²; δ – величина подвижки в очаге, м.

При описании горных ударов в рудниках с относительно невысоким энергетическим уровнем событий такие параметры событий, как площадь разрыва S и величина подвижки δ , ранее не определялись. И только когда энергия горно-тектонических ударов в рудниках приблизилась к энергии естественных землетрясений, эти параметры по аналогии с землетрясениями стали измеряться. В табл. 3 приведены указанные параметры для некоторых сильнейших горно-тектонических ударов в рудниках России [11]. На рис. 2 приведены геометрические схемы механизма этих ударов.

Других примеров в отечественной горно-технической литературе не найдено, поскольку при обследовании последствий событий в рудниках эти параметры не измерялись.

Учитывая закон самоподобия сейсмических процессов на разных масштабных уровнях, установленный М.А. Садовским с соавторами [12], динамические проявления горного давления в рудниках можно рассматривать как сейсмические события в массиве пород. Экстраполируя данные табл. 3, можно охарактеризовать эти события следующими параметрами (табл. 4).

Приведенные в табл. 4 данные получены на основе закона самоподобия сейсмических процессов на различных масштабных уровнях. В частности, известно [13], что при больших землетрясениях с магнитудой 7 – 8 протяженность разрывов достигает десятков – сотен километров, а смещения по разрывам исчисляются метрами. Поэтому параметры динамических проявлений горного давления в выработках рудников, энергетический уровень которых на несколько порядков меньше, чем у крупных землетрясений, выглядят вполне правдоподобно.

Зная характеристики очага динамических явлений в рудниках (см. табл. 4), можно по формуле (1) оценить энергетические характеристики этих явлений. Модуль сдвига пород G в горно-технических характеристиках обычно не измеряется. Поэтому определим его величину из известного установленного в геофизике [14] соотношения:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости пород, МПа; ν – коэффициент Пуассона для пород.

Таблица 3

Параметры некоторых сильнейших горно-тектонических ударов (ГТУ) в рудниках

Parameters of some of the most severe rock-tectonic bursts (RTB) in mines

Рудник, месторождение	Дата ГТУ	Параметры события		Очаговые параметры	
		Магнитуда, M_L	Энергетический класс, k	Площадь подвижки, S , м ²	Величина подвижки, см
Кировский (Хибинское апатитовое)	16.04.1989	4,3	10,5	220 000	2 – 9
«Умбозеро» (Ловозерское редкометальное)	17.08.1999	5,0	11,8	~500 м × 500 м = = 250 000	16

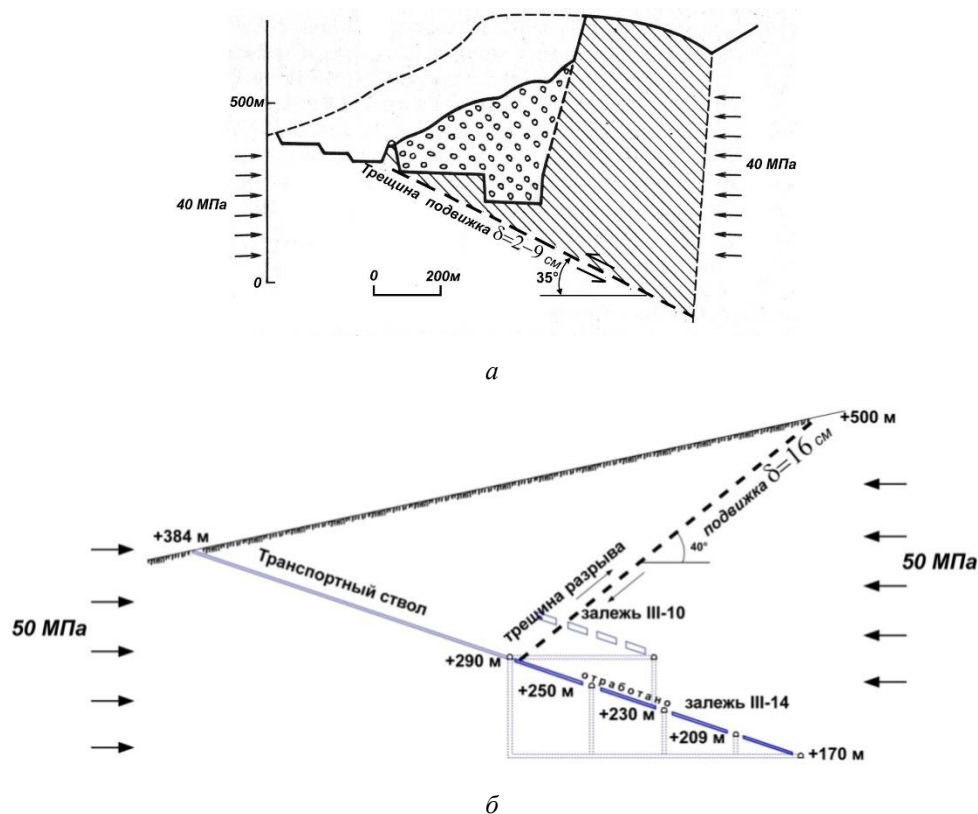


Рис. 2. Схемы механизма горно-тектонических ударов на Кировском руднике (а) и руднике «Умбозеро» (б)
 Fig. 2. Schemes of the mechanism of rock-tectonic bursts at the Kirov mine (a) and the Umbozero mine (b)

Таблица 4

Параметры динамических проявлений горного давления в рудниках
 Parameters of dynamic manifestations of rock pressure at mines

Вид проявления	Энергетические параметры		Очаговые параметры	
	Энергия, Дж	Энергетический класс, k	Характерная величина площади подвижки, m^2	Ориентировочная величина подвижки, см
Горно-тектонический удар, техногенное землетрясение	$10^9 - 10^{12}$	9 – 12	100 000	10
Горный удар, стрельяние пород	$10^5 - 10^8$	5 – 8	100	1.0
Разрушение стенок скважин	$10^0 - 10^1$	1 – 2	0,1	0,1

Таблица 5

Оценка величины сейсмического момента в очаге динамических проявлений горного давления
 Estimation of the magnitude of seismic moment in the focus of rock pressure dynamic manifestations

Форма динамических явлений	Площадь разрыва, m^2	Величина подвижки, м	Модуль сдвига пород, t/m^2	Сейсмический момент, т·м
Горно-тектонический удар	100 000	0,1	2 400 000	$2,4 \cdot 10^9$
Горный удар, стрельяние	100	0,01	2 400 000	$2,4 \cdot 10^6$
Разрушение стенок скважин, дискование керна	0,1	0,001	2 400 000	$2,4 \cdot 10^2$

Подсчитаем, в частности, модуль сдвига для пород Ловозерского редкометалльного месторождения (породы – нефелиновые сиениты: луавриты, уртиты, фойяиты): $E = 6 \cdot 10^4$ МПа; $\nu = 0,25$. Модуль сдвига, вычисленный по формуле (1), составит

$$G = \frac{60\,000\text{ МПа}}{2,5} = \frac{6\,000\,000\text{ Т/м}^2}{2,5} = 2,4 \cdot 10^6\text{ Т/м}^2.$$

Теперь, когда определены все параметры, входящие в формулу (1), по величине сейсмического момента в очаге можно оценить энергию динамических проявлений горного давления в горных выработках. Результаты таких оценок приведены в табл. 5.

В табл. 5 расчеты сделаны при модуле сдвига пород $G = 2,4 \cdot 10^6\text{ Т/м}^2$, значение которого характерно для скальных пород, в частности для пород Ловозерского месторождения. Полученные величины сейсмического момента для различных форм динамических проявлений горного давления соответствуют фактически наблюдаемым в рудниках, в частности энергетическим характеристикам горных и горно-тектонических ударов [7] и оценкам этих явлений другими авторами [15, 16].

Приведенные данные позволяют подтвердить закон самоподобия сейсмического процесса на разных масштабных уровнях, установленный М.А. Садовским с соавторами. Динамические проявления горного давления в рудниках (горные и горно-тектонические

удары, стрельяние пород и др.) представляют собой форму самоорганизации геологической среды под влиянием горных работ. Приведенные данные позволяют подтвердить тот факт, что форма и энергия динамических явлений в рудниках зависят от многих факторов, прежде всего от масштабов техногенного воздействия на массивы, их напряженного состояния, структурно-блокового строения, свойств пород и др.

Заключение

1. Приведена рациональная классификация структурно-блоковой неоднородности скальных массивов, наиболее приемлемая для условий рудников, основанная на классификации разрывных структур в скальных массивах, принятых в гидротехническом строительстве.

2. Показана зависимость форм проявлений горного давления в горных выработках от размеров техногенного вмешательства в горный массив и размера (порядка) структурной неоднородности массива, активизированной горными работами.

3. На основе закона самоподобия сейсмического процесса в массивах на различных масштабных уровнях выполнена оценка энергетических параметров различных проявлений горного давления. В результате оценки показано, что полученные энергетические показатели проявлений горного давления соответствуют фактическим данным о горных ударах в рудниках.

Библиографический список

1. Авершин С. Г. *Горные удары*. М.: Углетехиздат; 1995. 235 с.
2. *Прогноз и предотвращение горных ударов на рудниках*. Под ред. И. М. Петухова, А. М. Ильина, К. Н. Трубецкого. М.: Изд-во АГН; 1997. 376 с.
3. Петухов И. М., Линьков А.М. *Механизм горных ударов и выбросов*. М.: Недра; 1983. 280 с.
4. *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Положение по безопасному ведению горных работ на месторождениях, склонных и опасных по горным ударам»* (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 576 от 2 декабря 2013 г.).
5. СНиП 11.02.02-85. *Основания гидротехнических сооружений*. М.; 1986. 38 с.
6. Ловчиков А. В. Рациональная классификация структурно-блоковой неоднородности массивов для рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1999;(6):226–230.
7. *Каталог горных ударов на рудных и нерудных месторождениях Североуральское, Таштагольское, Октябрьское (Норильск), Кукисвумчорское (ПО «Апатит»), Качканарское и др.* Л.: ВНИМИ; 1989. 182 с.

8. Ловчиков А. В. Параметры очагов сильнейших горно-тектонических ударов на рудниках России. *Горный журнал*. 2000;(2):9-11.
9. Gibovicz S. J. *Keynote lecture: The mechanism of Seismic events induced by mining. A review. Rockburst and seismicity in mines*. Rotterdam: Balkema; 1990. P. 3-27.
10. Ebrahim-Trollope, R. Gutenberg–Richter relationship and mine-induced seismicity as observed at the African Rainbow Minerals mines—Klerksdorp. *Proc. Fifth Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines*. Van Aswegen, G., Durrheim, R. J., Ortlepp W. D. (eds.). The South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series S27; 2001. P. 501–508.
11. Ловчиков А. *Сильнейшие землетрясения и горно-тектонические удары в рудниках России*. Саарбрюкен: Palmarium Academic Publishing; 2016. 141 с.
12. Садовский М. А., Болховитинов Л. Г., Писаренко В. Ф. *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. М.: Наука; 1987. 100 с.
13. Гир Дж., Шах Х. *Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться*. М.: Мир; 1988. 220 с.
14. *Горная энциклопедия*. Т 5. М.: Советская энциклопедия; 1991. С. 263.
15. Смирнов В. А., Иванов-Ростовцев А. Т., Колотило Л. Г. *Междублоковая саморегуляция в иерархии структур*. Доклады РАН. 1992;323(4):664-666.
16. Johnston J. C. Rockburst from a global perspective. *Garlands Beiträge zur Geophysik*. 1989;98(6):474–490.

References

1. Avershin S.G. *Rock burst*. Moscow: Ugletekhizdat Publ.; 1995. 235 p. (In Russ.).
2. Petukhov I. M., Ilyin A. M., Trubetskoy K. N. (eds.) *Forecast and prevention of rock-bursts in mines*. Moscow: AGN Publishing House; 1997. 376 p. (In Russ.).
3. Petukhov I.M., Linkov A.M. *Rock burst and outburst mechanisms*. Moscow: Nedra Publ.; 1983. 280 p. (In Russ.).
4. *Federal standards and rules in the field of industrial safety “Regulations for the safe conduct of mining operations at deposits prone (and dangerous) to rockbursts”* (approved by Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision No. 576 of December 2, 2013). (In Russ.).
5. SNiP 11.02.02-85. *Foundation soils of hydraulic structures*. Moscow; 1986. 38 p. (In Russ.).
6. Lovchikov A. V. Rational classification of structural block heterogeneity of rock masses for mines. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 1999;(6):226–230. (In Russ.).
7. *Catalog of rockbursts at ore and nonmetallic deposits Severouralskoye, Tashtagolskoye, Oktyabrskoye (Norilsk), Kukisvumchorrskoye (PO Apatit), Kachkanarskoye and others*. Leningrad: VNIMI Publ.; 1989. 182 p. (In Russ.).
8. Lovchikov A. V. Parameters of focal points of the most severe rockbursts at Russian mines. *Mining Journal*. 2000;(2):9-11. (In Russ.).
9. Gibovicz S. J. *Keynote lecture: The mechanism of Seismic events induced by mining. A review. Rockburst and seismicity in mines*. Rotterdam: Balkema; 1990. P. 3-27.
10. Ebrahim-Trollope, R. Gutenberg–Richter relationship and mine-induced seismicity as observed at the African Rainbow Minerals mines—Klerksdorp. *Proc. Fifth Int. Symp. Rockbursts and Seismicity in Mines*. Van Aswegen, G., Durrheim, R. J., Ortlepp W. D. (eds.). The South African Institute of Mining and Metallurgy, Symposium Series S27; 2001. P. 501–508.
11. Lovchikov A. V. *The strongest earthquakes and rock-tectonic bursts in Russ. mines*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing; 2016. 141 p.
12. Sadovsky M. A., Bolkhovitinov L. G., Pisarenko V. F. *Deformation of geophysical environment and seismic process*. Moscow: Nauka Publ.; 1987. 100 p. (In Russ.).
13. Gere J., Shah H. *Unsteady terra firma. What is an earthquake and how to prepare for it*. Moscow: Mir Publ.; 1988. 220 p. (In Russ.).
14. *Mining Encyclopedia*. Vol. 5. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1991. p. 263.

15. Smirnov V. A., Ivanov-Rostovtsev A. T., Kolotilo L. G. Inter-block self-regulation in the hierarchy of structures. Proceedings of Russian Academy of Sciences. 1992;323(4):664-666. (In Russ.).
16. Johnston J. C. Rockburst from a global perspective. *Garlands Beiträge zur Geophysik*. 1989;98(6):474-490.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-39-48

Результаты исследований волнового характера опорного давления целиков и краевых частей угольных пластов

Лис С. Н.

Институт проблем комплексного освоения недр, Караганда, Республика Казахстан

Аннотация: Разработка свит пластов приводит к образованию в толще пород большого количества зон повышенного горного давления, образованных влиянием опорного давления краевых частей массива и целиков, оставленных на соседних пластах. Наличие таких зон резко ухудшает состояние подготовительных и капитальных выработок при разработке свит пластов. В статье приводятся результаты проведенных наблюдений на участках подземных выработок угольных шахт Карагандинского угольного бассейна, находящихся под и над целиками и краевыми частями вышележащих угольных пластов. Если опорное давление под целиками и краевыми частями угольных пластов достаточно интенсивно исследовалось, то опорное давление над целиками и краевыми частями угольных пластов практически не изучалось. Результаты проведенных исследований показали, что во всех выработках, в которых проводились наблюдения, высота участка выработки, расположенного над целиком (краевой частью), изменяется волнообразно. Характер влияния опорного давления меняется в зависимости от удаленности выработки от источника этого давления и определяется коэффициентом подработки K_p . Длина полуволны опорного давления соответствует шагу вторичного обрушения основной кровли угольного пласта, на котором расположен целик (краевая часть). Результаты проведенных исследований показали, что во всех выработках, в которых проводились наблюдения, высота участка выработки, расположенного под целиком (краевой частью), изменяется волнообразно. В результате проведенных исследований выявлен волновой характер стационарного опорного давления, распространяющегося вдоль пласта, на котором расположена выработка, по закону затухающей синусоиды по мере удаления от источника опорного давления. При этом длина полуволны $\lambda/2$ соответствует мощности основной кровли над выработкой.

Ключевые слова: опорное давление, целик, краевая часть пласта, зона повышенного горного давления, свита пластов, затухающая синусоида, длина полуволны.

Для цитирования: Лис С. Н. Результаты исследований волнового характера опорного давления целиков и краевых частей угольных пластов. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):39-48. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-39-48.

Findings of Studies on Wave Character of Pillar Support Pressure and Edge Parts of Coal Seams

S. N. Lis

Institute for Integrated Subsoil Use, Karaganda, Republic of Kazakhstan

Abstract: Extraction of coal measures leads to origination of a large number of increased rock pressure zones in rock mass, caused by the influence of abutment pressure of rock mass edge parts and pillars kept in adjacent seams. The presence of such zones sharply worsens the condition of development and permanent workings when developing coal measures. The paper presents the findings of the observations made in the areas of the underground workings in coal mines of Karaganda coal basin, located under and above pillars and edge parts of overlying coal seams. If abutment pressure under pillars and edge parts of coal seams has been studied quite actively, abutment pressure above the pillars and the edge parts of the coal seams has not been practically studied. The findings of the performed studies showed that in all the workings in which the observations were made, the height of the workings located underneath the pillar (the edge part) varies wavelly. The studies revealed wavelly behavior of the stationary abutment pressure propagating along the seam, in which the working is located, according to the law of damped sinusoid while increasing distance from the source of the abutment pressure. At the same time, the half-wave length $\lambda/2$ corresponds to the thickness of the main roof above the working. The height of the workings located above the pillar (edge part) also varies wavelly. At the same time, the nature of the abutment pressure influence varies depending on the distance of the working from the pressure source and is determined by undermining factor K_u . The abutment pressure half-wave length corresponds to the step of secondary collapse of the main roof of the coal seam on which the pillar (edge part) is located.



Keywords: abutment pressure, pillar, seam edge part, zone of increased rock pressure, coal measures, damped sinusoid, half-wave length.

For citation: Lis S. N. Findings of studies on wave character of pillar support pressure and edge parts of coal seams. *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):39-48. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-39-48.

Введение

Разработка свит пластов приводит появлению в толще пород большого количества зон повышенного горного давления (ПГД), образованных влиянием опорного давления краевых частей массива и целиков, оставленных на соседних пластах. Наличие зон ПГД резко ухудшает состояние подготовительных и капитальных выработок при разработке свит пластов. Общее генеральное требование к разработке свит угольных пластов сформулировано давно и сводится к полной выемке угля без оставления каких-либо целиков. К сожалению, при разработке угольных пластов в свитах до сих пор не удавалось во всех случаях осуществлять полную выемку угля: из-за сложных горно-геологических условий и для охраны различного рода объектов оставляют угольные целики. Вес пород, залегающих в кровле угольного пласта над выработанным пространством и не получивших опоры на почве выработки, перераспределяется на краевые части нетронутого пласта или целики, пригружая их. Эта пригрузка формирует зоны опорного давления [1], которые принято называть зонами повышенного горного давления (зона ПГД).

Производственный опыт указывает порождение зонами ПГД таких серьезных газодинамических явлений [2], как горные удары, внезапные выбросы угля и газа, разрушение механизированных крепей, завалы лав, повышенное газовыделение. При ведении горных работ в зонах ПГД значительно ухудшается состояние горных выработок. Это приводит к масштабным обвалам горного массива, поломкам проходческого оборудования, разрушению проектных сечений выработок. Тем самым нарушается

нормальный режим работы предприятия, повышается стоимость добычи полезного ископаемого и подвергаются опасности занятые в шахте люди [3–7].

Исследованиями, проведенными в нижележащем пласте при пересечении очистными работами зон ПГД, образованных от верхнего пласта, выявлены заметное влияние вышележащего пласта на нижний пласт в виде деформации пласта и нарушения сплошности его кровли, а также наличие в нижележащем очистном забое множества техногенных трещин и нарушений залегания угольного пласта и пород. Все это результат действия зоны ПГД от верхнего пласта. По исследованиям ВНИМИ и УкрНИМИ [6, 8] установлено, что целики с недостаточно большими размерами могут быть потенциально опасными по проявлению горных ударов [9].

На многих угольных месторождениях усложняются условия отработки в связи с возрастающей глубиной разработки месторождений и переходом на более сложные и часто изменяющиеся горно-геологические и горнотехнические условия. Рост глубины разработки, наличие больших площадей выработанных пространств в сочетании с влиянием многократной под- и надрабткой пластов приводит к появлению большого количества зон ПГД, увеличению их размера, усилению вредного влияния горного и газового давления на всю технологию горного производства. Изменение напряженного состояния массива в зонах ПГД отрицательно сказывается на безопасности ведения горных работ, сложнее становится управлять горным давлением в очистных и подготовительных выработках [5]. Это создает угрозу для жизни людей и нарушает нормальное ведение

горных работ. Затраты на ремонт подготовительных выработок, расположенных в зонах повышенного горного давления, в 2,0–2,5 раза и более превышают соответствующие показатели для подготовительных выработок, поддерживаемых в нетронutom массиве. При этом потери добычи достигают 20–25 % и более, повышается зольность угля [9, 10].

Известно, что вблизи краевой линии пласта горное давление изменяется волнообразно (волна Вебера). Эти процессы наиболее полно изучены в работе [11] для условий выработанного пространства, прилегающего к очистному забою. В другой работе [12] отмечается, что кинетика опорного давления впереди очистных работ формируется в виде волны. Эти исследования показали, что опорное давление имеет волнообразный характер с явно выраженной периодичностью чередований зон повышенного и пониженного давлений впереди фронта очистных работ.

Однако если опорное давление имеет волновой характер в плоскости разрабатываемого пласта, то аналогичный характер опорное давление должно иметь и под (над) этим пластом, т.е. под (над) краевыми частями и целиками угля. До сих пор этот вопрос не исследовался.

Цели, задачи и методы исследований

Целью исследований являлось определение характера распределения напряжений под (над) целиками и краевыми частями угольных пластов. В задачу входило определение изменения высоты участка выработки, пройденной под (над) целиком или краевой частью угольного пласта.

Автором были проведены исследования влияния стационарных зон опорного давления на подготовительные выработки, пересекающие зоны ПГД под (над) целиками и краевыми частями. Во время наблюдений производилось измерение высоты выработки h на участке, расположенном под (над) целиком или краевой частью. Для того чтобы опорное давление смогло проявиться в изменении высоты выработки в полной мере, наблюдения проводились в выработках, существующих не менее двух лет.

В данном случае высота выработки является косвенным свидетельством величины горного давления, поскольку чем выше горное давление, тем меньше сохранившаяся высота выработки в конкретной точке.

Результаты исследований

Исследования проведены на шахтах Карагандинского угольного бассейна. Результаты проведенных исследований показали, что во всех выработках, в которых проводились наблюдения, высота участка выработки, расположенного под (над) целиком (краевой частью) изменяется волнообразно. На рис. 1–6 приведены наиболее типичные примеры результатов проведенных наблюдений.

Далее описываются результаты исследований, проведенных в выработках, расположенных под (над) целиками и краевыми частями угольных пластов.

Вентиляционный штрек 42К₁₀–3 (рис. 1). Выработка расположена под краевой частью пласта К₁₂, вынимаемая мощность которого $m_b = 3,4$ м. Мощность междупластья $h_m = 82,5$ м. Коэффициент надработки $K_n = 24,3$. Угол влияния составил 86° . Высота выработки изменяется периодически и описывается затухающей синусоидой с длиной полуволны $\lambda/2 = 45$ м. Некоторое искажение и отклонение от синусоиды вносят участки штрека, находящиеся на сопряжении с выработками, проходящими перпендикулярно исследуемой.

Вентиляционный штрек 42К₁₀–3. Выработка расположена под целиком шириной 38 м, находящимся на надрабатываемом пласте К₁₂, вынимаемая мощность которого $m_b = 3,9$ м. Мощность междупластья $h_m = 81,1$ м. Коэффициент надработки $K_n = 21,9$. Угол влияния от правой кромки целика – 61° , от левой – 74° . Высота выработки с левой стороны от кромки целика изменяется по закону затухающей синусоиды с длиной полуволны $\lambda/2 = 45$ м. С правой стороны от кромки целика такая закономерность не наблюдается вследствие искажения, вносимого мелкоамплитудными нарушениями и сопряжением с выработкой, проходящей перпендикулярно исследуемой.

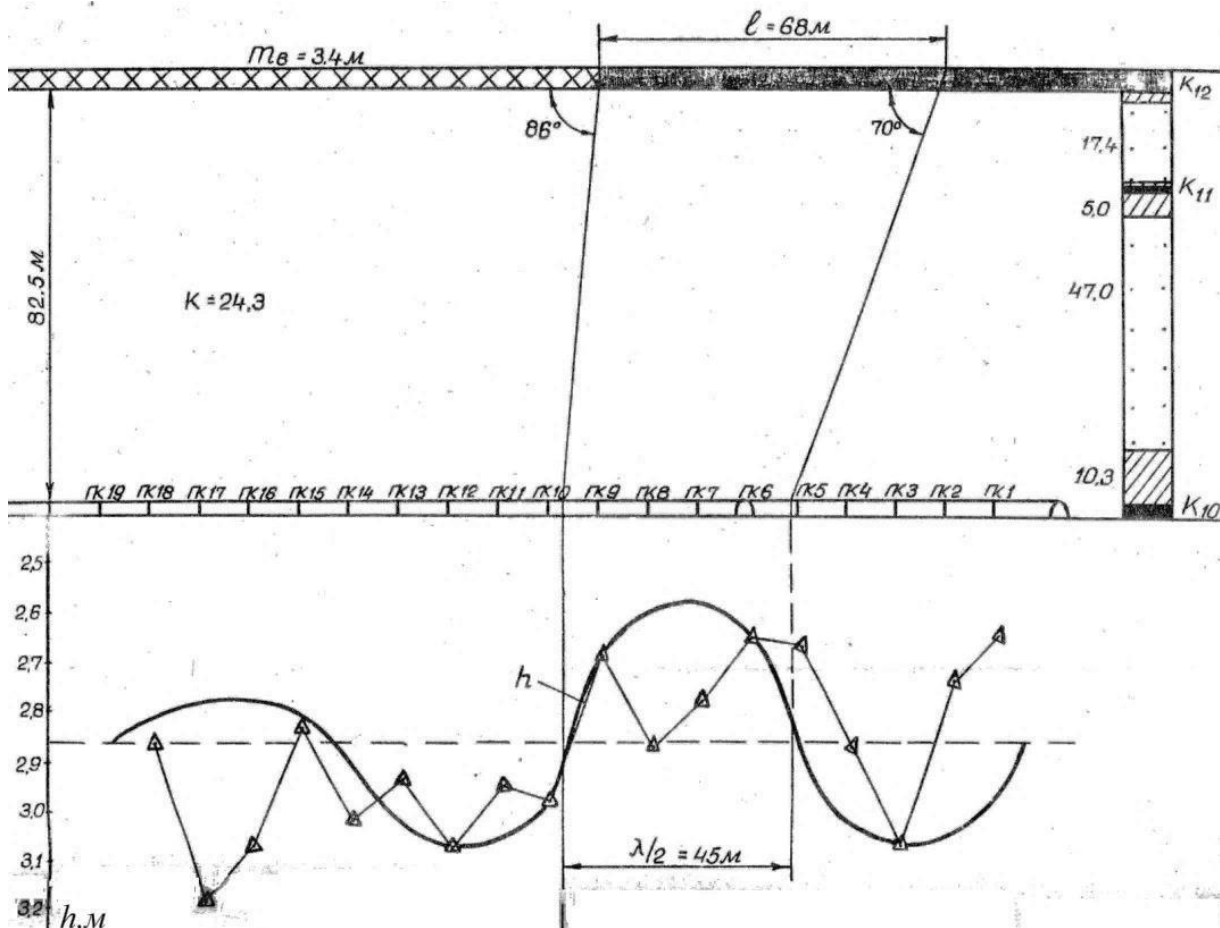


Рис. 1. Результаты наблюдений зоны ПГД от краевой части пласта в вентиляционном штреке 42K10 – 3

Fig. 1. Findings of observations of the increased rock pressure zone in ventilation drift 42K10 – W

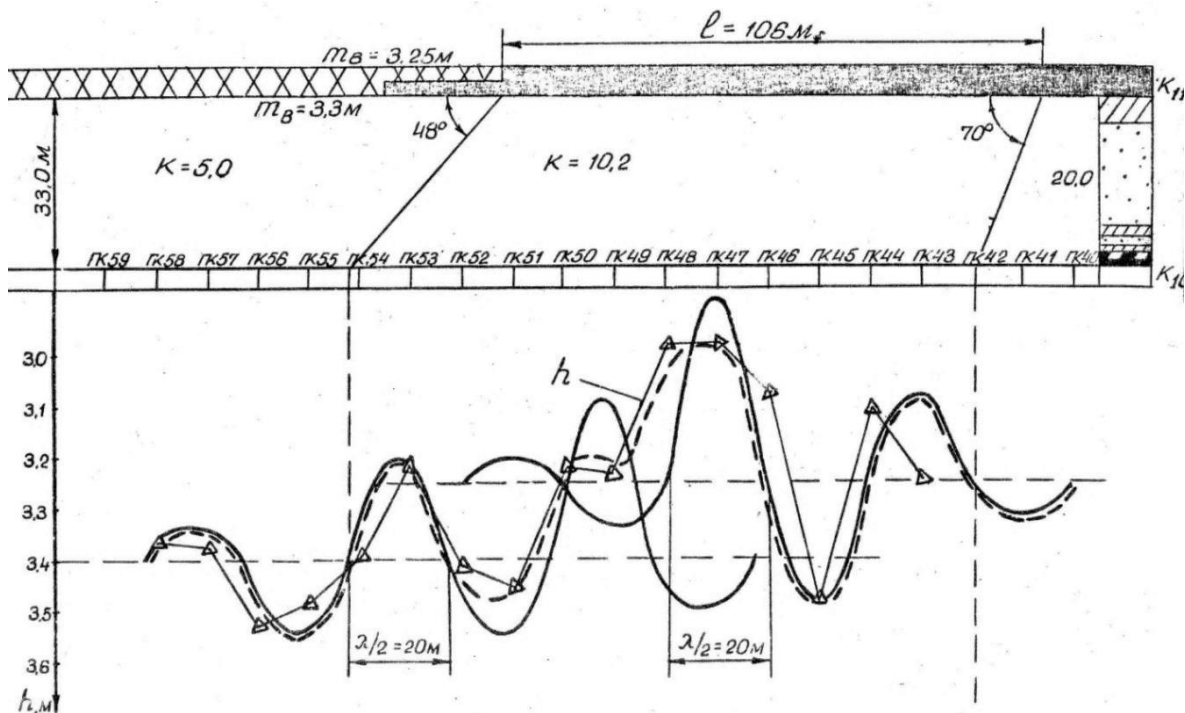


Рис. 2. Результаты наблюдений зоны ПГД в конвейерном промштреке 44K10 – 3

Fig. 2. Findings of observations of the increased rock pressure zone in conveyor drift 44K10 – W

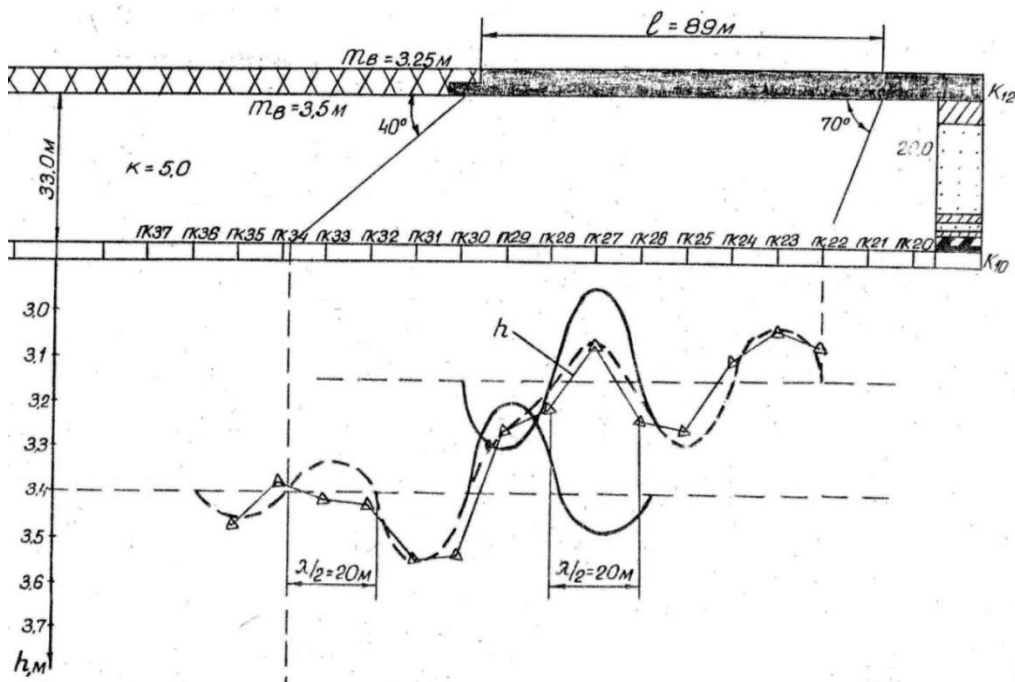


Рис. 3. Результаты наблюдений зоны ПГД в конвейерном промштреке 45K10 – 3

Fig. 3. Findings of observations of the increased rock pressure zone in conveyor drift 45K10 – W

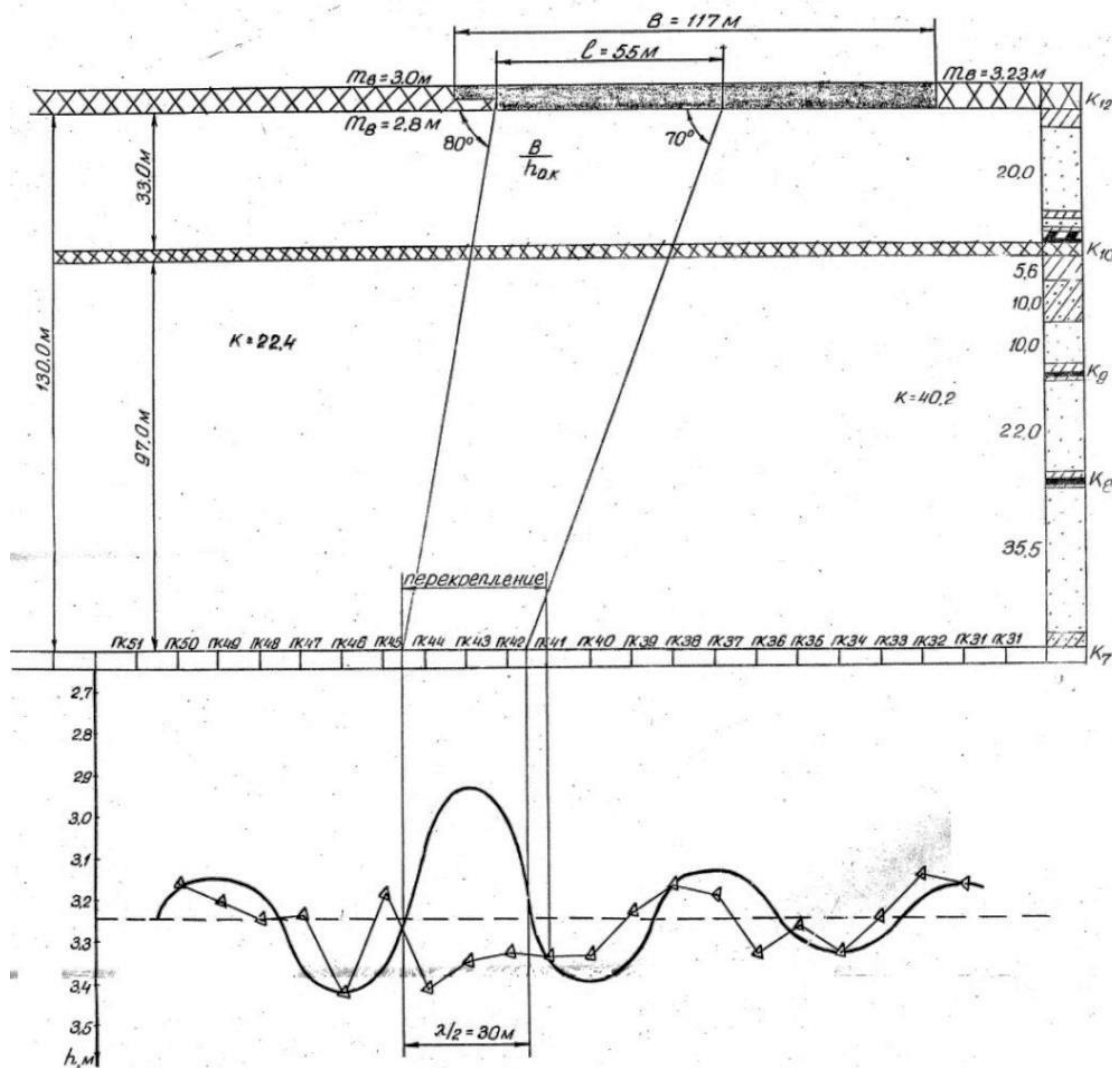


Рис. 4. Результаты наблюдений зоны ПГД в конвейерном бремсберге 43K7 – В

Fig. 4. Findings of observations of the increased rock pressure zone in conveyor incline 43K7 – E

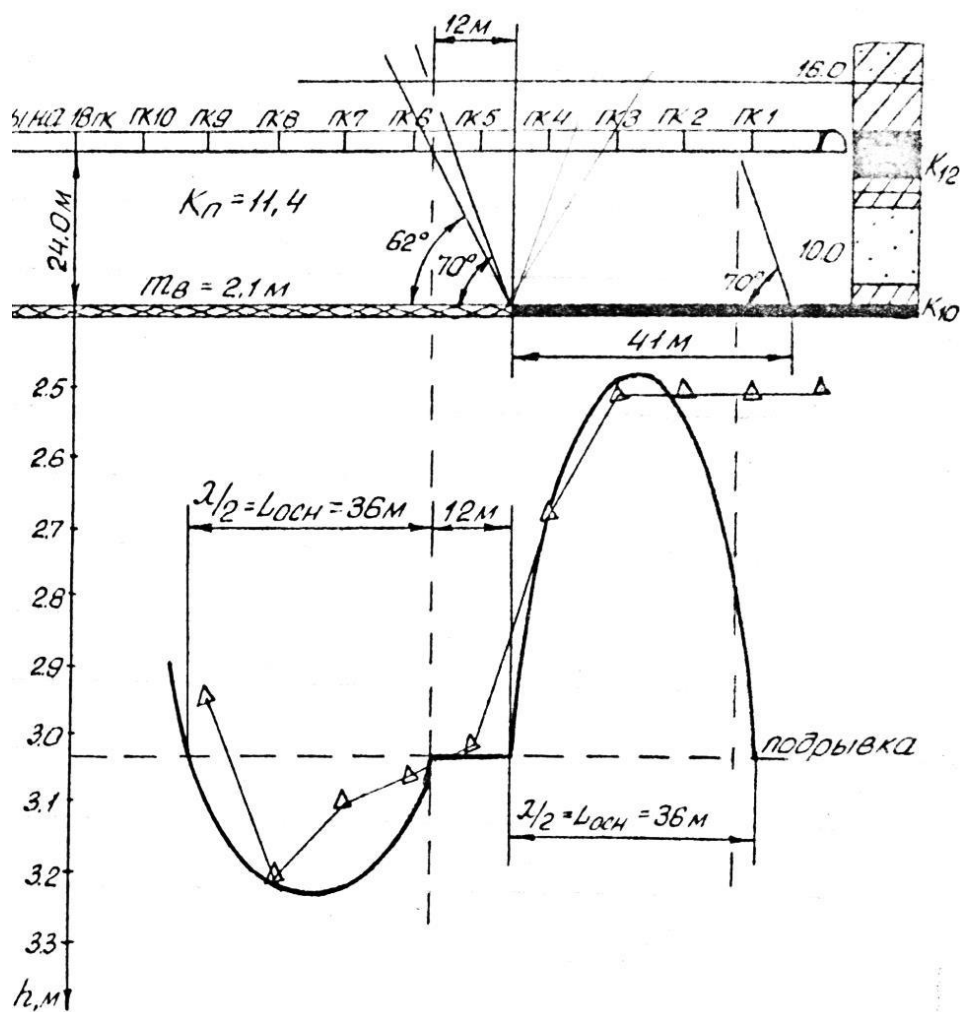


Рис. 5. Результаты наблюдений зоны ПГД в конвейерном штреке 22К12 – 1 – Ю

Fig. 5. Findings of observations of the increased rock pressure zone in conveyor drift 22K12 – 1 – S

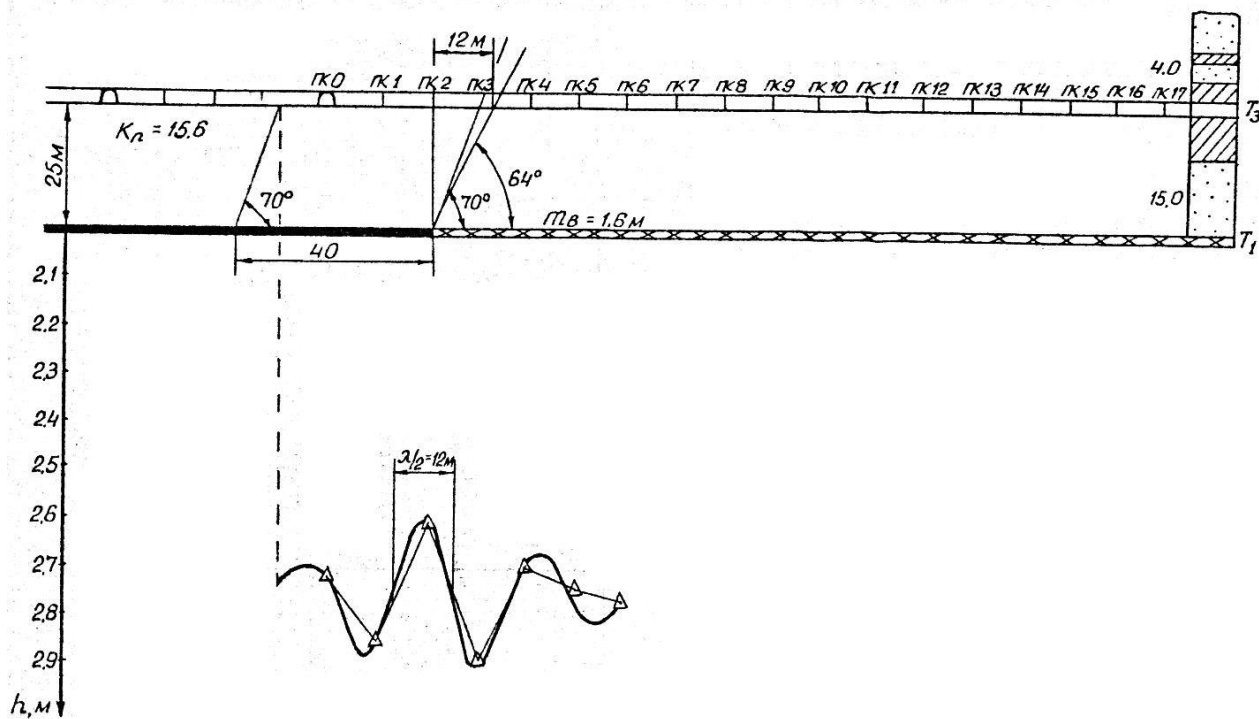


Рис. 6. Результаты наблюдений зоны ПГД в конвейерном штреке 133Т3 – Ю

Fig. 6. Findings of observations of the increased rock pressure zone in conveyor drift 133T3 – S

Конвейерный штрек 42K10 – 3. Выработка расположена под краевой частью пласта K_{12} , вынимаемая мощность которого $m_b = 5,1$ м. Мощность междупластья $h_m = 74,2$ м. Коэффициент надработки $K_n = 14,5$. Угол влияния составил 60° . Гармоническое изменение высоты выработки наблюдается только на участке выработки, находящемся по левую сторону от краевой части пласта K_{12} . Длина полуволны $\lambda/2 = 15$ м. Участок исследуемой выработки, находящейся под краевой частью угольного пласта, пересекает две близко расположенные выработки, которые вносят искажения в гармонический процесс.

Конвейерный промштрек 44K10–3 (рис. 2). Выработка расположена под уступом краевой части, образованным выемкой верхнего и нижнего слоев пласта K_{12} . Вынимаемая мощность верхнего слоя пласта $K_{12} - 3,25$ м, нижнего – $3,3$ м. Мощность междупластья $h_m = 33,0$ м. Коэффициент надработки $K_n = 5,0$. Угол влияния составил 48° . В изменении высоты выработки явно просматривается влияние двух гармонических процессов с длиной полуволны $\lambda/2 = 20$ м. Первый (нижняя синусоида) вызван выемкой верхнего слоя пласта K_{12} , второй возникает после выемки нижнего слоя этого пласта (верхняя синусоида), и поэтому формируется при более высоком уровне напряжений. Наложение двух гармонических процессов формирует более сложную картину деформирования выработки (общая кривая показана штриховой линией), чем при влиянии выемки одного слоя или одного пласта.

Конвейерный промштрек 45K10–3 (рис. 3). Выработка расположена под уступом краевой части, образованным выемкой верхнего и нижнего слоев пласта K_{12} . Вынимаемая мощность верхнего слоя пласта $K_{12} - 3,25$ м, нижнего – $3,5$ м. Мощность междупластья $h_m = 33,0$ м. Коэффициент надработки $K_n = 5,0$. Угол влияния составил 40° . Наложение двух гармонических процессов с длиной полуволны $\lambda/2 = 20$ м, как и в предыдущем случае, создает сложную картину деформирования

выработки. Тем не менее гармонический процесс хорошо просматривается.

Вентиляционный промштрек 41K1 – 3. Выработка расположена под уступом краевой части, образованным выемкой сближенных пластов K_3 и K_2 . Вынимаемая мощность пласта $K_3 - 3,07$ м, пласта $K_2 - 3,5$ м. Мощность междупластья $h_m = 47,0$ м. Коэффициент надработки $K_n = 7,1$. Угол влияния составил 46° . При выемке сближенных пластов, так же как и при выемке мощного пласта в два слоя, формируются два гармонических процесса, которые накладываются друг на друга. Длина полуволны гармонических процессов в данном случае составляет 14 м.

Конвейерный бремсберг 43K7–B (рис. 4). Выработка расположена под целиком шириной 117 м, находящимся на надрабатываемом пласте K_{12} , общая вынимаемая мощность которого $m_b = 5,8$ м. Мощность междупластья $h_m = 130,0$ м. Коэффициент надработки $K_n = 22,4$. Угол влияния от левой кромки целика – 80° , от правой измерения провести не удалось. В месте наибольшего влияния ПГД произведено перекрепление выработки. С учетом этого фактора изменение высоты выработки подчиняется гармоническому закону с длиной полуволны $\lambda/2 = 30$ м.

В этой же выработке проводились наблюдения влияния целика шириной 40 м, оставленного на пласте K_{12} . Мощность междупластья $h_m = 130,0$ м. Коэффициент надработки $K_n = 40,4$. Угол влияния составил 70° . Гармонический процесс не наблюдается. Повышенное давление отражается на изменении размеров выработки очень слабо.

Конвейерный штрек 5K7–B. Выработка расположена под краевыми частями, находящимися на пластах K_{12} и K_{10} . Просматривается влияние двух гармонических процессов. Угол влияния от пласта K_{12} составляет 66° , от пласта $K_{10} - 67^\circ$. Длина полуволн обоих гармонических процессов составляет 15 м.

Конвейерный штрек 22K12 – 1 – Ю (рис. 5). Выработка расположена над краевой частью пласта K_{10} , вынимаемая мощность которого

$m_b = 2,1$ м. Мощность междупластья $h_m = 24$ м. Коэффициент подработки $K_p = 11,4$. Угол влияния составил 62° . Наблюдается волновой процесс с длиной полуволны, равной 36 м. Однако полуволны разделены площадкой длиной 12 м, которая находится под консолью основной кровли. В районе сопряжения с выработкой, проходящей перпендикулярно исследуемой, наблюдается искажение волнового процесса.

Газодренажный штрек № 1 пласта K_{12} . Выработка расположена над краевой частью пласта K_{10} , вынимаемая мощность которого $m_b = 2,1$ м. Мощность междупластья $h_m = 22$ м. Коэффициент подработки $K_p = 10,5$. Наблюдается ярко выраженный волновой процесс. Длина полуволны составляет 36 м. Под консолью основной кровли имеется площадка длиной 11 м, которая разделяет полуволны. Угол влияния первой полуволны составляет 62° .

Конвейерный штрек 133 $T_3 - Ю$ (рис. 6). Выработка расположена над краевой частью пласта T_1 , вынимаемая мощность которого $m_b = 1,6$ м. Мощность междупластья $h_m = 25$ м. Коэффициент подработки $K_p = 15,6$. Угол влияния составляет 64° . Наблюдается затухающий гармонический процесс. Длина полуволны равна 12 м.

Вентиляционный штрек 112 $K_{12} - С$. Выработка расположена над краевой частью пласта K_{10} , вынимаемая мощность которого $m_b = 3,59$ м. Мощность междупластья $h_m = 85$ м. Коэффициент подработки $K_p = 23,7$. Угол влияния зафиксировать не удалось вследствие завала выработки над краевой частью пласта K_{10} . Длина полуволны гармонического процесса составляет 30 м.

Выводы

Результаты проведенных наблюдений показывают следующее.

1. Высота выработок, расположенных под целиками (краевыми частями) (см. рис. 1–4), изменяется по закону затухающей синусоиды. При этом длина полуволны $\lambda/2$ соответствует мощности основной кровли над выработкой.

2. Высота выработок, расположенных над целиками (краевыми частями) (см.рис. 5, 6), также изменяется волнообразно. Однако это изменение имеет более сложный характер, связанный со свойствами подработанного массива. В подработанном массиве среда изменяется по мере увеличения междупластья от сыпучей и трещиноватой до сплошной. Поэтому и характер влияния опорного давления меняется в соответствии с изменением среды. Здесь целесообразно использовать комплексный показатель удаленности горной выработки от источника опорного давления – кратность подработки K_p :

$$K_p = h_m / m_b,$$

где h_m – мощность междупластья, м; m_b – вынимаемая мощность подрабатываемого пласта, м.

При кратности подработки до 14,5 (зона обрушения согласно [13]) основным фактором, влияющим на характер опорного давления, является обрушаемость пород. В частности, длина полуволны опорного давления соответствует шагу вторичного обрушения пород основной кровли, который можно определить [14] по формуле

$$L = \sqrt{\frac{3h_{o.k} \sigma_{сж}}{\gamma_{o.k}}}, \text{ м}$$

где $h_{o.k}$ – мощность слоя пород основной кровли, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности на одноосное сжатие пород основной кровли, МПа; $\gamma_{o.k}$ – плотность пород основной кровли, т/м³.

При этом под зависшей консолью основной кровли имеется участок, не подверженный влиянию опорного давления (см. рис. 5, 6).

При кратности подработки от 14,5 до 21,0 (зона интенсивного расслоения [13]) происходит сглаживание различий между характером влияния опорного давления при подработке и надработке угольных пластов.

При дальнейшем увеличении мощности междупластья характер влияния опорного давления как при подработке, так и при надработке одинаков. Однако амплитуда изменений

высоты выработки и дальность влияния опорного давления при подработке в 1,6 раза больше, чем при надработке.

Таким образом, выявленный волновой характер распространения опорного давления под (над) целиками и краевыми частями позволяет прогнозировать проявления горного давления в зонах ПГД. Выявление закономерностей перераспределения напряжений под (над) целиками и краевыми частями угольных пластов позволит разработать достоверные методики и рекомендации по построению зон

ПГД для подготовительных и вскрывающих выработок, что существенно сократит протяженность выработок в зонах влияния целиков и краевых частей, оставленных на соседних пластах, за счет научно обоснованного определения конфигурации и дальности влияния зон ПГД и вследствие этого значительно уменьшит затраты на управление горным давлением в подготовительных и вскрывающих выработках при разработке свит угольных пластов.

Библиографический список

1. Ходырев Е. Д. Определение предельных размеров охранных угольных целиков и действующих в них напряжений. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2010;(6):170–180.
2. Зборщик М. П., Грищенко Н. Н. Компьютерное моделирование геомеханических параметров отработки свит угольных пластов. *Сб. науч. тр. НГА Украины*. 1999;(7):3–7.
3. Грищенко Н. Н., Черняев В. И. Расчет и построение зон повышенного горного давления при многократной подработке и надработке угольных пластов. *Горно-металлургические проблемы Донбасса: Сб. науч. тр.* Донецк: ДонГТУ. 1995;(1):80–90.
4. Литвиновская Н. А. *Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений из почвы при проходке подготовительных горных выработок в подработанном массиве соляных пород*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь; 2011. 17 с.
5. Петухов И. М., Беляков П. К., Зубков В. В. и др. *Оценка выбросоопасности угольных пластов в зонах повышенного горного давления*. М.; 1987. 35 с.
6. Петухов И. М. Горные удары на угольных шахтах. СПб., 2004. 238 с.
7. Калинин С. И., Лютенко А. Ф., Егоров В. П., Дьяконов С. Г. *Управление горным давлением при разработке пологих пластов с труднообрушаемой кровлей на шахтах Кузбасса*. Кемерово: Кемеровское кн. изд-во; 1991. 247 с.
8. *Расчет и экспериментальная оценка напряжений в целиках и краевых частях пласта угля: метод. указания*. Л.: ВНИМИ, 1973. 130 с.
9. Ходырев Е. Д. Построение зон ПГД на угольных пластах с учетом изменения горнотехнических и геологических факторов. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*. 2010;(7):64–75.
10. Рогачков А. В. *Обоснование способов обеспечения устойчивости подготовительных выработок в зонах повышенного горного давления при разработке сближенных пластов*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.; 2010. 20 с.
11. Черняк И. Л., Бурчаков Ю. И. *Управление горным давлением в подготовительных выработках глубоких шахт*. М.: Недра; 1984. 300 с.
12. Кузяра В. И., Колесников В. Г., Комлев Е. С., Светличный В. Н. Закономерности формирования опорного давления впереди очистных забоев. *Уголь Украины*. 1990;(11):15–16.
13. Лис С. Н., Вареха Ж. П. Самоорганизация горного массива при техногенных воздействиях на него. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2016;(7):237–250.
14. *Рекомендации по рациональному расположению и креплению подготовительных выработок при технологии бесцеликовой выемки угольных пластов на шахтах Карагандинского бассейна*. Караганда: КНИУИ; 1982. 40 с.

References

1. Khodyrev E. D. Determination of the limiting dimensions of protecting coal pillars and stresses in them. *Proceedings of UkrNIMI, National Academy of Sciences of Ukraine*. 2010;(6):170–180. (In Russ.).
2. Zborshchik M.P., Grischenkov N.N. Computer simulation of geotechnical parameters for mining coal measures. *Proceedings of National Mining Association of Ukraine*. 1999;(7):3–7. (In Russ.).
3. Grischenkov N. N., Chernyaev V. I. Calculation and simulation of increased rock pressure zones at multiple undermining and overworking of coal seams. *Mining and metallurgical issues of Donbass: Proceedings*. Donetsk, DonSTU. 1995;(1):80–90. (In Russ.).
4. Litvinovskaya N. A. *Prediction and prevention of gas-dynamic phenomena in the soil during drifting of development drifts in undermined salt rock mass*. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science. Perm; 2011. 17 p. (In Russ.).
5. Petukhov I. M., Belyakov P. K., Zubkov V. V. et al. *Evaluation of outburst hazard of coal seams under conditions of increased rock pressure*. Moscow; 1987. 35 p. (In Russ.).
6. Petukhov I. M. *Rock bursts at coal mines*. St. Petersburg; 2004. 238 p. (In Russ.).
7. Kalinin S. I., Lutenko A. F., Egorov V. P., Dyakonov S. G. *Rock pressure control during extraction of flat-lying seams with hard-to-collapse roofs at Kuzbass mines*. Kemerovo: Kemerovo Publishing House; 1991. 247 p. (In Russ.).
8. *Calculation and experimental assessment of stresses in pillars and edge parts of coal seam: Guidelines*. Leningrad: VNIMI; 1973. 130 p. (In Russ.).
9. Khodyrev E. D. Construction of increased rock pressure zones at coal seams taking into account changes in mining and geological factors. *Proceedings of UkrNIMI, National Academy of Sciences of Ukraine*. 2010;(7):64–75. (In Russ.).
10. Rogachkov A. V. *Substantiation of the methods to ensure stability of development drifts in zones of increased rock pressure when extracting contiguous seams*. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science. St. Petersburg; 2010. 20 p. (In Russ.).
11. Chernyak I. L., Burchakov Yu. I. *Rock pressure control in development drifts of deep mines*. Moscow: Nedra Publ.; 1984. 300 p. (In Russ.).
12. Kuzyara V. I., Kolesnikov V. G., Komlev E. S., Svetlichny V. N. Regularities of abutment pressure origination in front of stoping faces. *Coal of Ukraine*. 1990;(11):15–16. (In Russ.).
13. Lis S. N., Vareha J. P. Self-organization of a rock mass under anthropogenic impacts on it. *Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016;(7):237–250. (In Russ.).
14. *Recommendations on rational arrangement and support of development drifts when using the method of pillar-free extraction of coal seams at the Karaganda basin mines*. Karaganda: KNIU Publ.; 1982. 40 p. (In Russ.).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55

Исследование процесса формирования зон опорного давления в системе «парные штреки»

Титов Н. В., Иванов С. И.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова,
Новочеркасск, Россия

Аннотация: Вопросы обеспечения геомеханической устойчивости горных выработок при разработке угольных месторождений всегда считались достаточно сложными и требовали особого внимания соответствующих служб горных компаний. Именно комплексные исследования формирования зон опорного давления в геомеханической системе «парные штреки», включающие численное моделирование, основанное на методе конечных элементов, позволили авторам получить новые результаты. Для моделирования использовались упругопластическая модель Мора – Кулона, а также физико-механические свойства угля и вмещающих пород. Моделирование проводилось для конкретных горно-геологических условий залегания антрацитового пласта k_2 . В одном программном модуле моделировались несколько стадий, позволяющих определить величину напряжений и смещений кровли в выемочных выработках на различных этапах формирования опорного давления впереди движущегося очистного забоя. В результате моделирования получены значения напряжений и смещений кровли в массиве вокруг выемочных выработок при различных стадиях проявления зон опорного давления, позволяющие применить метод планирования эксперимента для оптимизации параметров охранной конструкции в виде податливого целика. Данные исследования направлены на повышение эффективности охраны выемочных выработок путем оптимизации параметров охранных конструкций (податливого целика) для повышения производительности очистного забоя при отработке пологих антрацитовых пластов, в том числе опасным по горным ударам.

Ключевые слова: опорное давление, парные штреки, податливый целик, охрана выемочных выработок, антрацитовые пласты, ударобезопасность, численное моделирование.

Для цитирования: Титов Н. В., Иванов С. И. Исследование процесса формирования зон опорного давления в системе «парные штреки». *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):49-55. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55.

Study of Abutment Pressure Zone Formation in the System of "Paired Drifts"

N. V. Titov, S. I. Ivanov

Mining Institute, Kola Scientific Center of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract: The paper presents comprehensive studies of abutment pressure formation zones in the geotechnical system of "paired drifts", including numerical simulation based on the finite element method. For the simulation, the Mohr – Coulomb elastic-plastic model was used, as well as physico-mechanical properties of coal and host rocks. The simulation was carried out for specific mining and geological conditions of k_2 anthracite seam occurrence. In a software module, several stages were simulated, allowing to determine magnitude of stresses and displacements of the roof in stopes at various stages of abutment pressure formation in front of the advancing stoping face. As a result of the simulation, the values of the stresses and displacements of the roof in the rock mass around the stopes at various stages of the development of the abutment pressure formation zones were obtained, enabling using the experimental design method to optimize the parameters of adjustable pillar (as support structure). These studies are aimed at improving efficiency of stope protection by optimizing the parameters of protective support structures (adjustable pillars) to increase productivity of the stoping face during excavation of flat-lying anthracite seams, including rockburst-dangerous ones.

Keywords: abutment pressure, paired drifts, adjustable pillar, stope protection, anthracite seams, rockburst safety, numerical simulation.

For citation: Titov N. V., Ivanov S. I. Study of abutment pressure zone formation in the system of "paired drifts". *Gornyye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):49-55. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-49-55.



Введение

Опыт отработки пологих антрацитовых пластов Восточного Донбасса на глубинах свыше 500 м показал неэффективность, а часто и невозможность повторного использования выемочных выработок из-за неудовлетворительного выполнения охранной функции искусственными ограждающими конструкциями (БДБ, БЖБТ и др.), что, в свою очередь, существенно влияет на снижение нагрузки на очистной забой [1, 3–5, 8].

В этих условиях актуальной является проблема оптимизации параметров межштрековых целиков, обладающих достаточной несущей способностью для охраны будущего вентиляционного штрека, с одной стороны, и обеспечивающих полную ударобезопасность – с другой, так как рассматриваемые пласты потенциально опасны по горным ударам [7, 11–14, 19].

В настоящее время достижение высоких нагрузок на очистной забой возможно только при однократном использовании выемочных штреков (с оставлением межъярусных охранных целиков для поддержания подготовительных выработок). Мировая практика показывает, что эффективные показатели работы очистных забоев достигаются при применении многоштрековых схем подготовки выемочных столбов. Рекордные показатели были достигнуты на шахтах США – 10 млн т/год; 1,6 млн т/мес.; 57 тыс. т/сут, в благоприятных горно-геологических условиях именно при использовании многоштрековых схем с оставлением целиков [16–18]. Опыт работы шахт США, достигших наивысших показателей в мире, представляет особый интерес при проектировании горных работ.

Нами предполагается изучить эффективность комплекса мероприятий по оформлению искусственной податливости антрацитовому целику с последующим его упрочнением для увеличения несущей способности при возможно минимальной его ширине.

Методы исследований

Для решения поставленной задачи на первом этапе необходимо провести исследования процесса формирования зон опорного давления в условной системе «парные штреки: конвейерный штрек верхней лавы – вентиляционный штрек нижней лавы».

В исследованиях нами закладываются наиболее сложные условия функционирования вентиляционного штрека нижней лавы – такие же, как при повторном его использовании. В этом случае нагрузки на штрек от опорного давления будут распределяться в следующих зонах:

- 1-я зона – проявление опорного давления при проведении выработки;
- 2-я зона – поддержание выработки в массиве до начала очистных работ;
- 3-я зона – формирование опорного давления впереди движущегося очистного забоя;
- 4-я зона – динамическое проявление опорного давления (тах) при подходе лавы (в окне лавы);
- 5-я зона – динамическое проявление опорного давления после прохода лавы с последующей стабилизацией опорного давления;
- 6-я зона – формирование опорного давления впереди движущегося второго очистного забоя;
- 7-я зона – динамическое проявление опорного давления (тах) при подходе второй лавы (в окне второй лавы);
- 8-я зона – динамическое проявление опорного давления после прохода лавы с последующей стабилизацией опорного давления [6, 15, 20].

Определяющим фактором (по величине нагрузок на крепь выемочных выработок) является опорное давление в окне лавы, которое характеризуется:

- формированием и обрушением зависящих консолей пород кровли в выработанном пространстве, создающих динамическую составляющую опорного давления;

– суммарным воздействием изгибающих моментов слоев пород, залегающих от пласта до поверхности.

Нами проведены комплексные исследования по формированию зон опорного давления в условной системе «парные штреки», включающие численное моделирование, которое совместно с эмпирическими методами и накопленным опытом позволяет выполнить оценку динамических процессов, происходящих в породном массиве при ведении горных работ. Применяемый способ основан на методе конечных элементов, также используется рациональный метод планирования эксперимента для решения геомеханической задачи [2, 9, 10].

Моделируемый процесс формирования зон опорного давления в геомеханической системе «парные штреки» выполнен в программной среде Plaxis. Основой для моделирования послужили горно-геологические условия шахты «Обуховская». Марка угля – А; пласт k_2 ; $\gamma = 1,67 \text{ т/м}^3$; $m = 0,98\text{--}1,35 \text{ м}$; $m_{\text{ср}} = 1,16 \text{ м}$; строение пласта – простое; $f = 2\text{--}3$; $\sigma_{\text{сж}} = 20 \text{ Мпа}$; $\alpha = 5\text{--}8^\circ$.

Непосредственная кровля, представленная песчаником мощностью 0,95 м; f – до 124; $\gamma = 2,68 \text{ т/м}^3$, переходящим в песчаный сланец ($m = 3,68 \text{ м}$; $f = 7\text{--}94$; $\gamma = 2,74 \text{ т/м}^3$), характеризуется как среднеустойчивая.

Основная кровля сложена песчаником ($m = 4,6 \text{ м}$; $f = 12\text{--}14$; $\gamma = 2,74 \text{ т/м}^3$). Песчаник

мелкозернистый, кварцевый, кремненый, крепкий. Основная кровля характеризуется как труднообрушающаяся на западе и среднеобрушающаяся на востоке.

Непосредственная почва представлена песчаным сланцем ($m = 0,9\text{--}1,2 \text{ м}$; $f = 7\text{--}9$; $\gamma = 2,71 \text{ т/м}^3$), почва пласта характеризуется как устойчивая, не склонная к пучению.

Для реализации нелинейного характера деформирования массива использовалась упругопластическая модель Мора – Кулона и физико-механические свойства угля и вмещающих пород.

Естественное напряженно-деформированное состояние массива задавалось вертикальными и горизонтальными напряжениями, приложенными внутри конечно-элементной модели. Вертикально сжимающие напряжения массива горных пород принимались равными весу столба горных пород до земной поверхности:

$$\sigma_z = \gamma H, \text{ т/м}^2.$$

Расчетная схема конечно-элементной модели (рис. 1) представляет собой участок массива с размерами $25 \times 90 \text{ м}$ с выработками прямоугольной формы сечения. Расстояния от моделируемых выработок до границ модели выбраны таким образом, чтобы исключить влияние на результаты моделирования граничных условий. По граням расчетной модели закреплены перемещения по всем осям.

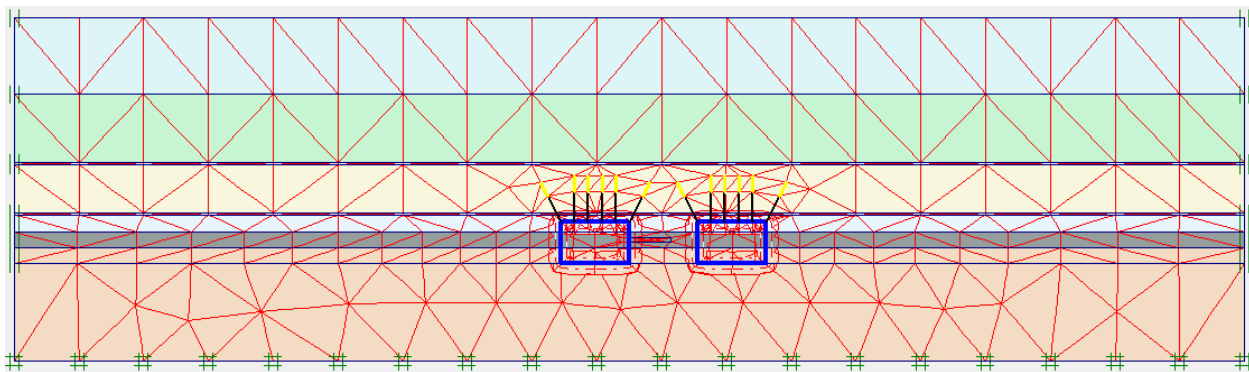


Рис. 1. Схема конечно-элементной модели

Fig. 1. Layout of the finite element model

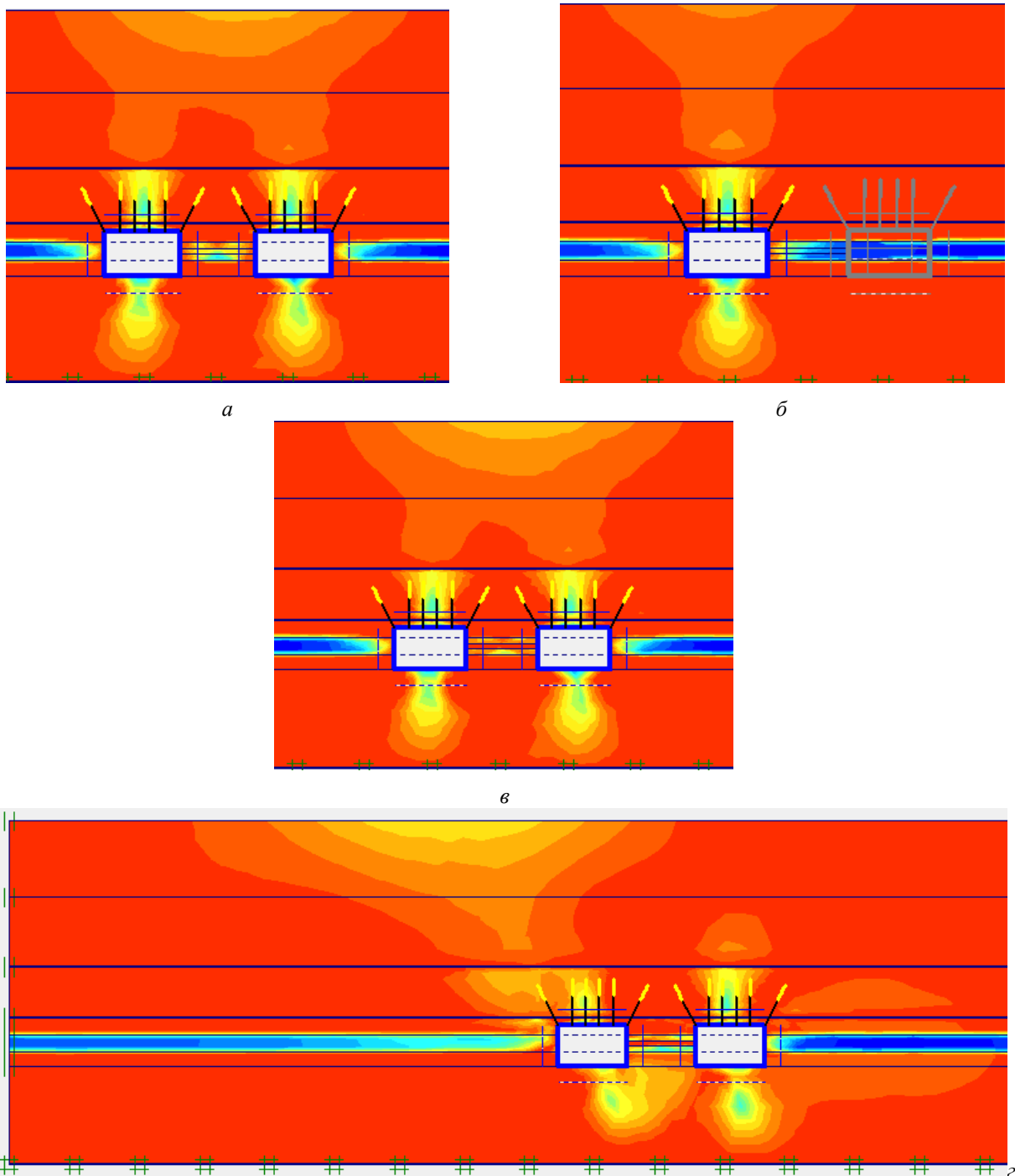


Рис. 2. Напряжения вокруг парных выработок:
a – 1-я стадия ; *б* – 2-я стадия ; *в* – 3-я стадия ; *г* – 4-я стадия

Fig. 2. Stresses around the paired workings:
a – 1st stage; *b* – 2nd stage; *c* – 3rd stage; *d* – 4th stage

Таблица 1

Полученные значения

The obtained values

Выработка	Стадия	Напряжение по контуру выработки, kN/m	Смещение кровли, ΔU , м
Конвейерный штрек	3	$-17,75 \cdot 10^3$	$82,64 \cdot 10^{-3}$
Конвейерный штрек	4	$26,79 \cdot 10^3$	$120,57 \cdot 10^{-3}$
Вентиляционный штрек	3	$-17,21 \cdot 10^3$	$81,51 \cdot 10^{-3}$
Вентиляционный штрек	4	$-18,20 \cdot 10^3$	$86,67 \cdot 10^{-3}$

Последовательно в одном программном модуле моделировалось несколько стадий (рис. 2):

– 1-я стадия – проведение конвейерного штрека опережающей проходкой вне зоны влияния очистных работ;

– 2-я стадия – проведение вентиляционного штрека для смежного выемочного столба вне зоны влияния очистных работ первого выемочного столба;

– 3-я стадия – задание искусственной податливости межштрековому целику;

– 4-я стадия – влияние максимального опорного давления впереди движущегося очистного забоя первого выемочного столба.

Для каждой стадии решались упругопластические задачи. При этом на каждой последующей стадии учитывались расчетные данные, полученные на предыдущей.

Результаты исследований

В результате моделирования получены значения напряжений и смещений кровли в массиве вокруг выемочных выработок при различных стадиях формирования опорного давления (табл. 1). Наибольший интерес представляют 3-я и 4-я стадии, поведение выработок при задании искусственной податливости

межштрековому целику и воздействия максимального опорного давления впереди движущегося очистного забоя.

Из полученных данных видно, что величина смещения кровли выработок значительно превышает расчетное смещение кровли, которое составляет $U_m = 37,50$ мм. Величину смещений кровли выработок можно нейтрализовать системой определенных мер, а именно оформлением охранной конструкции с оптимальными параметрами, способной выдерживать максимальные нагрузки от опорного давления.

Заключение

Полученные в результате моделирования данные используются для решения задачи по оптимизации параметров охранных конструкций (податливого целика), для чего будет применен рациональный метод планирования эксперимента с целью решения геомеханической задачи.

В настоящее время проведены лабораторные испытания закладочного материала с использованием связующих смол, построена матрица плана расчетного эксперимента.

Библиографический список

1. Бажин Н. П., Весков М. И., Комиссаров М. А. Расположение, охрана и поддержание подготовительных выработок в глубоких шахтах. *Труды ВНИМИ. Исследование проявлений горного давления на глубоких горизонтах*. Л.; 1971. С. 150–165.
2. Бауэр М. А., Дмитриенко В. А. Анализ напряженно-деформированного состояния монолитной бетонной крепи подземных сооружений некругового очертания. *Инженерный вестник Дона*. 2017;47(4(47)):199. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3916>.
3. Григорьев В. Л. Охрана и поддержание подготовительных и выемочных выработок, подверженных влиянию очистных работ. *Добыча угля подземным способом*. 1981;(7):20–22.
4. Иванов С. И., Титов Н. В., Ткачев В. А., Привалов А. А. Охрана горных выработок с помощью податливых целиков. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):159–166. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-161-166.
5. Иванов С. И., Титов Н. В., Ткачев В. А., Привалов А. А. Система разработки пластов средней и малой мощности длинными столбами по простиранию составлением породы в шахте. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(8):174–178. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-174-178.
6. Медведчук Н. Д. Влияние скорости подвигания очистного забоя на проявление горного давления при разработке пологих пластов. *Уголь Украины*. 1967;(4).
7. *Рекомендации по безопасному ведению горных работ на склонах к динамическим явлениям угольных пластах*. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_227032.

8. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР. 4-е изд., доп. Л.: ВНИМИ; 1986. 222 с.
9. Badalyan G. G., Dmitrienko V. A., Skomorokhov A. A. Resource-saving Technology of Building of Vertical Mine Working in Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2293-2301. URL: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
10. Bauer M. A., Dmitrienko V. A., Kapustin A. I. Assessment of Deformations of Earth`s Surface at Mine Construction on Sub-Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2278-2286. URL: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
11. Bolesta M., Menze G. Verfestigungsinjektion auf dem Bergwerk Ost mit einem hochfesten mineralischen Bindemittel. *Gluckauf*. 2003;(1):56–59.
12. Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gebirgsschlaggefahr. *Gluckauf*. 2002;(3):18–22.
13. Langhanki B. Planungskonzeption zur Doppelnutzung einer Rechteckankerstrecke. *Gluckauf*. 2002;(1):11.
14. Matusche T., Stratmann T. AVSA Parallelisiertes Ankern und Schneiden in Bogenstrecken. *Gluckauf*. 2002;(4):7–14.
15. Padera Z. Investigation of the influence of the bottom face movement speed on the manifestation of rock pressure during the development of a coal seam on models of equivalent materials. *Gluckauf*. 1969;(9).
16. Stive Fisor. Total Number of Longwall Faces Drops Below 50. *Coal Age*. 2009;(2):24–32.
17. Syd S. Peng. *Longwall Mining*. West Virginia University; 2006. 621 p.
18. Syd S. Peng. *Coal Mine Ground Control*. West Virginia University; 2008. 750 p.
19. Tönjes B., Voß H.-W., Mehlmann W. Kombiausbaustrecke auf dem Bergwerk Ewald/Hugo. *Gluckauf*. 2001;(1):28.
20. Varvo M. Influence of the extraction rate on the manifestation of deformations and pressure in the bottom-hole space. *Gluckauf*. 1969;(15).

References

1. Bazhin N. P., Veskov M. I., Komissarov M. A. Location, protection and maintenance of development drifts in deep mines. *Proceedings of VNIMI. The study of rock pressure manifestations at deep levels*. Leningrad; 1971. P. 150–165. (In Russ.).
2. Bauer M. A., Dmitrienko V. A. Analysis of stress-strain state of monolithic concrete lining of non-circular shape underground structures. *Don Engineering Bulletin*. 2017;47(4(47)):199. Available from: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3916>. (In Russ.).
3. Grigoriev V. L. Protection and maintenance of development drifts and stopes subject to stoping influence. *Underground coal mining*. 1981;(7):20–22. (In Russ.).
4. Ivanov S. I., Titov N. V., Tkachev V. A., Privalov A. A. Mine working protection using adjustable pillars. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):159–166. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-161-166. (In Russ.).
5. Ivanov S. I., Titov N. V., Tkachev V. A., Privalov A. A. Method of longwall mining of medium and low thickness seams along the strike with abandonment of rock in mine. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(8):174–178. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-174-178.
6. Medvedchuk N.D. Effect of stoping face advance rate on rock pressure manifestation when extracting flat-lying seams. *Coal of Ukraine*. 1967;(4). (In Russ.).
7. Recommendations for safe mining of coal seams prone to dynamic phenomena. Available from: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_227032/ (in Russ.).
8. *Guidelines for rational location, protection, and maintenance of mine workings at coal mines of the USSR*. 4th Ed., add. Leningrad: VNIMI Publ.; 1986. 222 p. (in Russ.).
9. Badalyan G. G., Dmitrienko V. A., Skomorokhov A. A. Resource-saving Technology of Building of Vertical Mine Working in Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2293-2301. Available from: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
10. Bauer M. A., Dmitrienko V. A., Kapustin A. I. Assessment of Deformations of Earth`s Surface at Mine Construction on Sub-Soil Original Research Article. *Procedia Engineering*. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016)*. 2016;150:2278-2286. Available from: <http://www.journals.elsevier.com/procedia-engineering>.
11. Bolesta M., Menze G. Verfestigungsinjektion auf dem Bergwerk Ost mit einem hochfesten mineralischen Bindemittel. *Gluckauf*. 2003;(1):56–59.
12. Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gebirgsschlaggefahr. *Gluckauf*. 2002;(3):18–22.

13. Langhanki B. Planungskonzeption zur Doppelnutzung einer Rechteckankerstrecke. *Gluckauf*. 2002;(1):11.
14. Matusche T., Stratmann T. AVSA Parallelisiertes Ankern und Schneiden in Bogenstrecken. *Gluckauf*. 2002;(4):7–14.
15. Padera Z. Investigation of the influence of the bottom face movement speed on the manifestation of rock pressure during the development of a coal seam on models of equivalent materials. *Gluckauf*. 1969;(9).
16. Stive Fiscor. Total Number of Longwall Faces Drops Below 50. *Coal Age*. 2009;(2):24–32.
17. Syd S. Peng. *Longwall Mining*. West Virginia University; 2006. 621 p.
18. Syd S. Peng. *Coal Mine Ground Control*. West Virginia University; 2008. 750 p.
19. Tönjes B., Voß H.-W., Mehlmann W. Kombiausbaustrecke auf dem Bergwerk Ewald/Hugo. *Gluckauf*. 2001;(1):28.
20. Varvo M. Influence of the extraction rate on the manifestation of deformations and pressure in the bottom-hole space. *Gluckauf*. 1969;(15).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-56-68

**Анализ эффективности реализации компетентностного подхода
в программе опережающего обучения горнодобывающей компании****Климов И. Ю.**

ПАО «Михайловский ГОК», Железногорск, Россия

Аннотация: Формирование кадрового потенциала горнодобывающих компаний – сложная и многофакторная задача, решение которой зависит от значительного числа условий. Именно отсутствие универсальных решений, влияние факторов времени, региона, достаточности ресурсного обеспечения определяет высокую ценность уже реализованных решений или подходов в реализации специализированных образовательных программ, направленных на повышение качества кадрового потенциала компании. Рассматриваются конкретный кейс, связанный с разработкой программы изменения компетенций работников ремонтной службы горно-обогачительной промышленности, и его апробация в реальных условиях перестройки производственного цикла. Целью проекта является оценка возможности внедрения принципов опережающего обучения с точки зрения психологической готовности работников к изменениям на промышленном предприятии. Рассматривается степень эффективности данного способа развития персонала. Задачи проекта направлены на формирование групп работников по степени их влияния на производимые изменения; исследуется входящая оценка готовности к исполнению роли «проводника изменений»; осуществляется реализация обучающих мероприятий, направленных на повышение данной готовности; дается выходная оценка эффективности проведенных обучающих действий. В ходе реализации проекта использовались следующие методы и инструменты: компетентностный подход, социологический и экспертный опросы, статистический анализ, обучение в формате тренингов и лекций, решение теоретических и практических кейсов. По итогам реализованной программы изменения компетенций можно сделать вывод о динамике роста психологической готовности принять масштабные и локальные изменения в нескольких сферах производственного и сопутствующих процессов у работников, участвовавших в предлагаемых развивающих мероприятиях. Полученные данные свидетельствуют о целесообразности вложения ресурсов производственных компаний в проактивное и опережающее развитие работников не только с позиций профессиональных компетенций, но и по иным компетенциям, направленным на психологическую готовность к изменениям и понимание потребности непрерывного обучения среди инженерно-технических работников (ИТР), эффективно выполняющих роль «проводника изменений» на производстве.

Ключевые слова: компетентностный подход, реорганизация ремонтных служб, опережающее обучение, проводники изменений на производстве, индикаторы компетенций, проактивное развитие работников.

Для цитирования: Климов И. Ю. Анализ эффективности реализации компетентностного подхода в программе опережающего обучения горнодобывающей компании. *Горные науки и технологии*. 2020;5(1):56-68. DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-56-68.

**Analysis of Soft Skills-Based Approach Effectiveness
in Advanced Training Program for Mining Company****I. Yu. Klimov**

PJSC "Mikhailovsky GOK", Zheleznogorsk, Russia

Abstract: The paper considers a specific case related to the development of a program for upgrading soft skills of employees of maintenance service in mining and processing industry, and its testing in actual practice of the production cycle rearrangement. The project aim is to assess the potential of introducing the principles of advanced training from the viewpoint of psychological readiness of employees for changes at an industrial enterprise. The degree of effectiveness of this staff training method is considered. The project objectives are aimed at forming groups of workers based on the degree of their influence on the changes produced; the incoming assessment of readiness to fulfill the role of “change champions” is studied; implementation of training activities aimed at improving employee’s readiness; output assessment of the training activities effectiveness is produced. In the project implementation, the following methods and tools were used: soft skills-based approach, sociological and expert surveys, statistical analysis, trainings and chalk and talk sessions, solution of the theoretical and practical cases (problems). Based on the results of the implemented soft skills changing (upgrading) program, the dynamics of increasing psychological readiness of employees (who participated in the proposed training activities) to accept large-scale and local changes was revealed. The study findings present rationale for investing funds of production



companies in proactive and advanced development of employees from the standpoints of both professional competencies and soft skills aimed at psychological readiness for changes and understanding the need for lifelong learning of engineers and technicians, being effective "change champion" in production activities.

Keywords: soft skills-based approach, reorganization of maintenance services, advanced training, "change champions", indicators of soft skills, proactive development of employees.

For citation: Klimov I. Yu. Analysis of soft skills-based approach effectiveness in advanced training program for mining company. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology (Russia)*. 2020;5(1):56-68. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2020-1-56-68.

Введение

В 1950-е гг. популярной теорией экономического и социального развития стала теория человеческого капитала [1]. Ее основная идея заключалась в том, что приобретенные человеком знания и практические навыки являются тем бесценным ресурсом, благодаря которому возможно эффективное управление, прежде всего в экономической сфере жизни. Как следствие, должны были относительно благополучно развиваться и социальная, и личностная составляющие человеческого бытия. Однако начиная с конца 1990-х – начала 2000-х гг. картина мира резко изменилась. Произошла цифровая революция, человек оказался во власти непрерывных технологических вызовов, которые трудно однозначно оценить в состоянии потока быстрорастущих информационных и дигитальных изменений, которые прочно вошли в повседневную и практическую жизнь человека [2, 3].

Все это требует нововведений в области управления производством. Возрастает требование к работникам во всех импликациях. Человек вынужден постоянно учиться, перестраивать свои представления о работе, обретать все новые и новые знания. «Возникает запрос на образование на протяжении всей жизни» [4–7]. Непрерывное образование включает как традиционные способы переподготовки кадров, так и новационные формы обучения на производстве, с учетом специфики производственной деятельности и реальных возможностей персонала. Экономические исследования, опирающиеся на тестовые системы оценки мыслительной активности человека, показали,

что «когнитивные навыки в значительной степени определяют занятость и уровень заработной платы работника, удовлетворенность трудовой деятельностью и способность соответствовать профессиональному стандарту» [6]. Поэтому развитие компетенций, направленных на умение коммуницировать, быстро принимать решения, брать на себя ответственность за результаты труда и людей и т.д. является приоритетным в любой современной производственной сфере [8, 9].

При этом надо понимать, что теория и практика зачастую сильно различаются. Одно дело декларировать необходимость непрерывного обучения и самосовершенствования современного человека. Другое дело понимать, что обучаться должны живые люди со сложившимися стереотипами, не всегда понимающие или не желающие понять те новации, которые неизбежно происходят внутри того или иного производственного цикла.

В качестве примера обратимся к опыту работы на одном из горно-обогатительных комбинатов, развивающем новейшие технологии современного производства. С 2017 г. на комбинате стартовала масштабная программа организационных и технических изменений, затрагивающая и производство, и человеческий фактор. Одним из важнейших блоков данной программы была реорганизация ремонтных служб. После анализа масштабов изменений HR-службой комбината был выявлен риск низкой эффективности программы в связи с неготовностью людей к быстрому восприятию изменений и соответствующих тре-

бований к саморазвитию. Приходилось принимать во внимание специфику самого производства в сфере тяжелого машиностроения, относящегося к опасному виду производства. Методы и подходы в операционной работе здесь изменяются редко. Поэтому риск неприятия новаций, предполагающих кардинальное перестроение процессов и кадровых решений, потенциально имел критическое значение [10, 11].

Приведем пример, связанный с ремонтными процессами. Использовался метод экспертного опроса (включая очный опрос и заочное анкетирование), было опрошено 8 руководителей высшего управленческого звена и 17 руководителей среднего звена и ключевых специалистов. Также были применены мозговой штурм и метод комиссий, используемый группой экспертов комбината, который выявил фактическую неготовность ряда ключевых и рядовых специалистов использовать новые технологии при ремонте оборудования (планирование, закупку запасных частей и расходных материалов, организационные изменения).

С целью снизить риски руководством компании была разработана программа развития персонала, суть которой заключалась в том, чтобы повысить показатели компетенции «готовность к изменениям» у работников ремонтной вертикали. Но с учетом большой численности этих работников технически провести необходимые мероприятия для всех трудозатратно и дорого. В связи с этим HR-вертикаль сосредоточилась на обучении ключевых руководителей, которые должны были затем «нести в массы» новые идеи и подходы. Речь идет о руководителях среднего звена: начальниках участков, механиках/главных механиках подразделений и заместителях начальников цехов по ремонтам. Именно они должны были стать активными «проводниками изменений» в компании.

Путем анализа компетенций руководителей, демонстрирующих эффективное внедрение изменений на нескольких предприятиях

горно-металлургического сегмента, была зафиксирована модель идеального «проводника изменений». Ее определение можно свести к следующему: руководитель должен обладать компетенциями «готовность к изменениям», «лидерство» и «публичные выступления».

Описание компетенций

Компетенция «готовность к изменениям» – базовый стиль поведения работника в условиях изменений, характеризующий степень его внутреннего сопротивления нововведениям, сопровождающим рабочий процесс, и/или открытость и готовность принимать инновации и перестраивать привычный алгоритм действий.

«Проводники изменений» – функция лидера рабочего коллектива при внедрении нововведений в конкретный рабочий процесс для вовлечения коллег и демонстрации положительных эффектов от изменений, а также снижения общегруппового уровня сопротивления. Как правило, данную функцию выполняют работники с развитой на высоком уровне компетенцией «готовность к изменениям».

Компетенция «лидерство» – способность работника оказывать влияние на коллектив, получать поддержку со стороны других членов группы для достижения цели.

Компетенция «публичные выступления» – умение работника через выступление перед большой аудиторией выражать свои мысли и идеи и убеждать слушающих разделять высказываемые идеи.

Индикаторы компетенций «готовность к изменениям» и «лидерство» приведены ниже.

«Готовность к изменениям»:

- позитивно транслирует изменения, указывая на их возможности;

- предлагает изменения/нововведения, направленные на улучшение рабочих процессов;

- при внедрении изменений учитывает необходимость привлечения дополнительных ресурсов;

- проясняет и учитывает интересы заинтересованных сторон при продвижении своей позиции;

- сталкиваясь с трудностями, продолжает действовать для достижения оговоренного результата.

«Лидерство»:

- обладает устойчивым авторитетом среди коллег и подчиненных;

- является примером для коллег и подчиненных;

- вовлекает, воодушевляет окружающих на достижение результата;

- имеет свою позицию по различным вопросам и открыто ее высказывает;

- сталкиваясь с возражениями со стороны оппонентов, находит эффективные доводы в поддержку своей позиции;

- готовность признать собственную неправоту в дискуссиях с подчиненными.

Данные компетенции относятся главным образом к социально-эмоциональной сфере и лишь косвенно связаны с когнитивными – профессиональными компетенциями. Однако их развитие должно стать основой именно для укрепления профессиональных компетенций и одновременно укрепить уверенность человека в своих способностях и возможности сохранить идентичность в условиях информационно-технологических вызовов. Компетенция «готовность к изменениям» была выявлена в качестве ключевой: только собственный пример мог стать основой для заражения новыми идеями остальных членов коллектива. Практика показывает, что тогда, когда руководители скептически относятся к изменениям и исключительно «по должности» рассказывают о них рабочему коллективу, коллектив легко распознает неискренность и, даже формально принимая нововведения, в итоге не разделяет новые ценности, либо минимизирует свою активность, либо вовсе саботирует процессы [9]. Следующая ключевая компетенция – «лидерство» также является ключевой, поскольку, для того чтобы коллектив быстрее и проще

принимал происходящие изменения, преподавать их должен тот, кому данный коллектив доверяет и за кем готов идти в неизвестность (ведь сопротивление изменениям всегда порождается высокой степенью неизвестности). Соответственно «проводник изменений» должен быть лидером, не только с точки зрения должности, но и неформально. Выявление степени развития данной компетенции и ее повышение также стало одной из важнейших задач программы.

Третья компетенция – «публичные выступления» несколько менее значима для «проводника изменений». Тем не менее умение выстроить свою речь логично, последовательно и аргументированно является большим преимуществом для «проводника изменений». Помимо этого, «проводник изменений» должен уметь выдерживать критику и переубеждать сопротивляющихся изменениям работников в живом диалоге.

Таким образом, была сформулирована основная цель программы развития: на выходе выявить ряд ключевых работников (целевой показатель – 45–50 человек, верхний уровень – 75 человек, нижний уровень – 30 человек), у которых были бы развиты вышеперечисленные компетенции. Это требуется для успешной реализации программы комбината по инновационному развитию.

С учетом подготовительных работ к изменению структуры ремонтной вертикали на реализацию программы было отведено девять месяцев, таков период активной фазы, в течение которого участники программы регулярно принимали участие в обучающих мероприятиях. Также был выделен второй период в 6 месяцев для применения участниками программы полученных знаний и навыков на практике – так называемая постактивная фаза. Для оценки полученных результатов была разработана следующая программа.

1. Оценка трех ключевых компетенций на входе в программу.

2. Обучение двум базовым инструментам бережливого производства – системе «5S» и картированию рабочего процесса.

Данное обучение должно было влиять на «готовность к изменениям». На этом этапе обучения слушателям предлагается подробный разбор механизмов работы новых инструментов, апробация их влияния на общую работу комбината и обнаружение частных эффектов внутри структурных подразделений.

3. Проведение технического обучения в НИТУ «МИСиС» (направление ремонта). Новые знания в технической области должны частично повысить компетенцию «лидерство», поскольку руководители, обладающие большими знаниями, имеют дополнительные основания для демонстрации лидерских управленческих навыков. Также данное обучение расширяет кругозор и дает осознание необходимости регулярных нововведений с целью участия в конкурентной борьбе с другими предприятиями отрасли. Таким образом, косвенно развивается компетенция «готовность к изменениям».

4. Проведение тренингов личностного развития, направленных на повышение эффективности работы в условиях изменений (внутренние тренинги и внешние провайдеры). Данные тренинги были проведены по трем направлениям, каждое из которых направлено непосредственно на развитие соответствующей компетенции (soft skills [12, 13]): «готовность к изменениям», «лидерство» и «публичные выступления».

5. Итоговая оценка на выходе из программы по истечении постактивной фазы.

Описание программы

Для отбора участников программы были определены ключевые должности и возрастное ограничение (с учетом того, что «проводники изменений» должны транслировать идеи менеджмента в долгосрочной перспективе, была установлена верхняя возрастная планка). После формального отбора был сформирован список из 180 работников.

1. Оценка ключевых компетенций.

Оценке ключевых компетенций предшествовала подготовка внутренних оценщиков и разработка балльной системы для фиксации результатов. Для этого был приглашен консультант, имеющий опыт в проектах по разработке моделей компетенций. В результате подготовительных мероприятий была сформирована следующая оценочная модель: по результатам оценки каждый оцениваемый работник должен был попасть в одну из четырех категорий: категория *D* – работник с низко развитыми компетенциями и низкой мотивацией на личное развитие; категория *C* – работники с хорошо развитой лидерской компетенцией, но не готовые активно принимать изменения и нововведения; категория *B* – работники с высокоразвитой «готовностью к изменениям», но низким лидерским потенциалом; категория *A* – работники с достаточно высокоразвитыми лидерскими навыками и готовностью принимать изменения.

Оценка проводилась методом интервью по компетенциям.

По итогам интервью были получены следующие результаты: из 180 работников 40 человек не были допущены к участию в программе из-за крайне высокого уровня начального сопротивления и низкой мотивации. Было выявлено, что запланированные мероприятия по данным людям не дадут даже минимального эффекта, в связи с чем их участие в программе нецелесообразно. Из оставшихся 140 человек 44 были отнесены к категории *D* (данный показатель был прогнозируемым); 29 человек были отнесены к категории *A* (что оказалось незначительно выше предположений); 40 человек – к категории *C* (данные показатели также были прогнозируемы в силу высокой административной культуры, предполагающей прямо пропорциональное развитие лидерских качеств в соответствии со статусом на руководящих должностях) и 27 человек отнесены к категории *B*, что оказалось немного ниже ожиданий.

Распределение по группам на входе представлено на рис. 1.

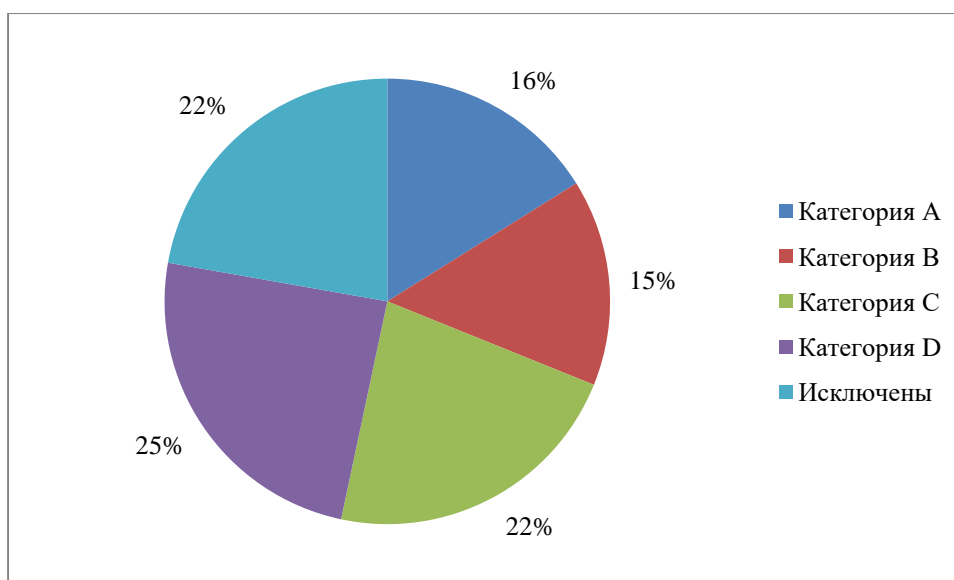


Рис. 1. Распределение контингента слушателей по группам на «входе» программы

Fig. 1. Grouping of trainees into divisions at the entry of the program

Можно заметить, что распределение по группам различается незначительно – это говорит о том, что до начала программы на комбинате не было систематической работы по развитию исследуемых компетенций у руководителей среднего звена ремонтных служб. И так, равномерное распределение показывает, что лидерство и готовность к изменениям, а также их отсутствие формировалось у людей спорадически, в том числе в силу личностных особенностей. Идеальным результатом, к которому стремится компания, является показатель в 40 % – категория А, по 15 % – категории В и С и менее 10 % – категория D. Таким образом, прирост категории А составил 25 % за счет уменьшения доли работников категорий D и С.

2. Обучение инструментам бережливого производства (компетенция «готовность к изменениям»).

Одним из ключевых моментов планируемых изменений было внедрение элементов системы бережливого производства. Первым шагом было внедрение инструмента производственной системы «5S» и картирования рабочих процессов. Обучение всех участников программы проводилось силами комбината. При этом внутренние преподаватели прошли предварительную подготовку как по направлениям

бережливого производства, так и по преподавательской деятельности.

По итогам обучения участники программы должны были начать применение данных инструментов на своих производственных участках. При этом данная работа актуализировала для них проблему мотивации рабочего персонала и общую тенденцию к сопротивлению. Это позволило повысить мотивацию на обучение участников программы.

3. Третьим этапом программы было обучение технической части ремонтов (компетенции «готовность к изменениям», «лидерство»).

После проведения социологического мини-исследования было выявлено, что для рабочего персонала одной из важнейших составляющих лидера, за которым они готовы идти, является техническая грамотность. То есть руководитель/лидер должен быть профессионалом своего дела и иметь обширный багаж знаний по своему направлению. В связи с этим на данном этапе программы было организовано обучение по ремонтным направлениям. При этом были приглашены преподаватели одного из ведущих российских вузов в области горного дела. Обучение было разбито по нескольким функциональным направлениям – ремонт горнотранспортного оборудования, ремонт фабричного оборудования, энергоэффективность.

Одной из поставленных перед преподавателями задач было предоставление информации по мировым тенденциям и трендам в области ремонтов. Данная задача была сформулирована в связи с тем, что обладание дополнительными знаниями также является одной из характеристик лидера.

Кроме повышения лидерской компетенции данное обучение влияло и на компетенцию «готовность к изменениям», поскольку перед преподавателями стояла дополнительная задача – информирование участников программы о применении инновационных методов и технологий в ремонтах на аналогичных российских предприятиях. Данная информация имела психологическое влияние на готовность к изменениям по принципу социального доказательств [14, 15]. Также были проведены тренинги личностного развития (компетенции «готовность к изменениям», «лидерство», «публичные выступления»). Для успешной реализации программы был применен компетентностный подход. С его помощью «...мы выявили три основные компетенции: (1) содействие в разработке структуры и установке руководящих принципов, (2) вынесение суждений о качестве или определенности доказательств, а также (3) преобразование доказательств в рекомендацию по дальнейшему улучшению работы» [16, с. 561]. В современной науке развитие компетентностных подходов лежит в основе ряда отраслей наук, не только гуманитарных, но и естественных [17]. Ранее они в зародышевом виде определялись в социальной сфере методами социологии [18, 19].

4. Четвертым шагом было проведение серии тренингов для участников программы, направленных непосредственно на развитие трех вышеобозначенных ключевых компетенций. Тренинг на развитие лидерского потенциала проводился для работников, попавших в категорию В (с развитой компетенцией «готовность к изменениям» и низким уровнем лидерства). Тренинг на повышение адаптивности к изменениям, снижение уровня первичного сопротивления и умение понимать и принимать

происходящие изменения проводился для работников, попавших в группу С. Тренинг на развитие публичных выступлений проводился для работников категории А. Также для всех категорий работников был проведен тренинг по основам менеджмента.

В ходе проведения тренинга было получено умозрительное подтверждение правильности проведенной оценки по компетенциям, по отзывам тренеров, которые могли сравнивать групповую динамику и проявления ключевых компетенций. Группы с «лидерами» были гораздо более инертными и сложными с точки зрения принятия тренерского материала, но при этом в групповых активностях всегда чувствовалась конкуренция за доминирующие позиции. В группах «готовых к изменениям», напротив, прием нового материала проходил легко, но групповые активности требовали времени, поскольку немногие готовы были брать на себя инициативу и лидерство. По окончании тренингов было заметно некоторое улучшение входных позиций, но тем не менее для более корректной оценки требовались время и возможность применить полученные знания и умения непосредственно на практике.

С учетом того, что все участники программы являются руководителями среднего звена, у каждого из них была возможность для ежедневной практики по полученным умениям в работе с сопротивлением, проявлению лидерских качеств и публичным выступлениям.

5. Итоговая оценка на выходе из программы.

Через 6 месяцев после проведения тренингов, по истечении постаивной фазы программы была проведена итоговая оценка работников, участвующих в программе. Целью было определение того, насколько повлияла активная фаза на работу участников программы по внедрению и продвижению происходящих в компании изменений в рабочие коллективы. Кроме того, важно было выявить наличие или отсутствие изменений в развитии ключевых компетенций у участников программы.



Рис. 2. Демографические характеристики исследуемых групп

Fig. 2. Demographic characteristics of the studied groups

Для решения поставленных задач было проведено социологическое исследование, в котором принимали участие все работники, прошедшие развивающие мероприятия в рамках программы (группа 1), а также руководители и работники тех же структурных подразделений аналогичного уровня управления, но не участвовавшие в программе (группа 2). Первая группа состояла из 101 работника, вторая – из 120 работников.

Демографические данные сравниваемых групп приведены на диаграммах (рис. 2).

Из приведенных данных видно, что сравниваемые группы сопоставимы по основным социальным и демографическим показателям. Это дает возможность проведения статистически корректного сравнительного анализа.

Результаты опроса показали, что работники, участвовавшие в программе, обладают более системным мышлением в оценке масштабов происходящих изменений. Так, на вопрос о том, в какой степени происходящие изменения затрагивают деятельность работника, участники программы суммарно на 10 % лучше понимают, что любые изменения влияют на их деятельность полностью, а не частично. Это подтверждается *t*-критерием Стьюдента, с вероятностью более 95 % показывающим статистическую значимость межгрупповых различий в оценке респондентами того, насколько происходящие изменения в компании касаются каждого члена исследуемых групп (рис. 3).

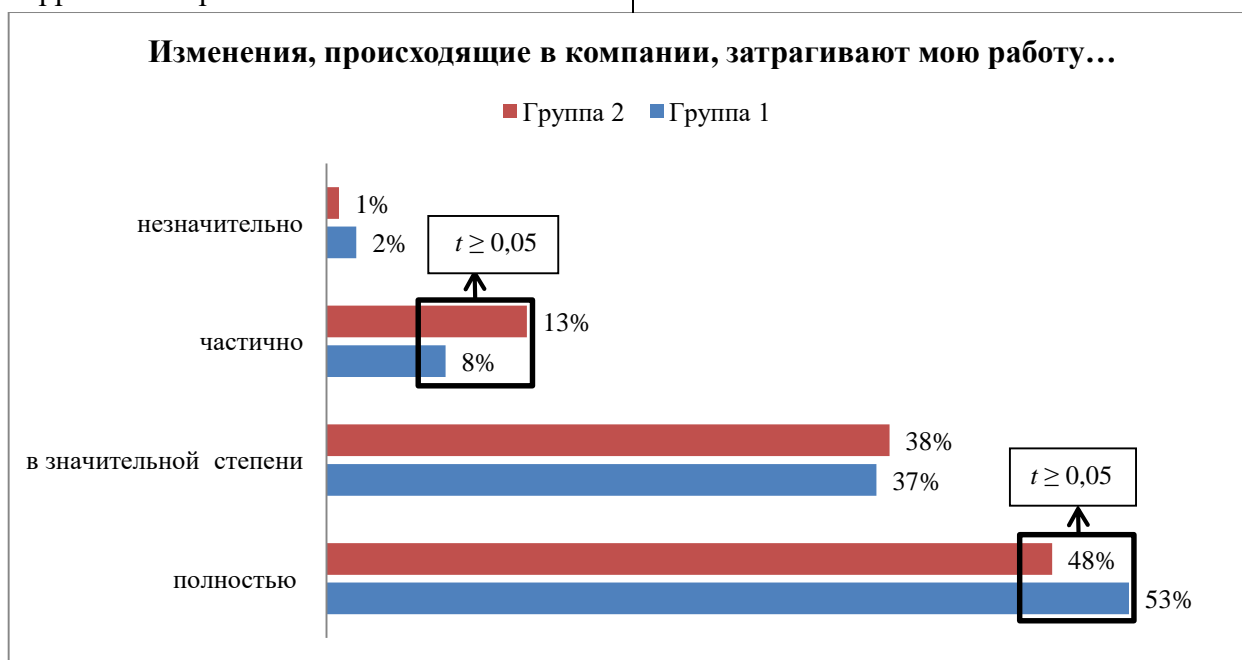


Рис. 3. Статистический анализ межгрупповых различий по критерию «Изменения, происходящие в компании, затрагивают мою работу...»

Fig. 3. Statistical analysis of intergroup differences based on the criterion "Changes in the company affect my work ..."

Кроме того, результаты выявили, что работники, участвовавшие в программе, научились лучше видеть перспективу происходящих изменений и оценивать их пользу. На вопрос, как влияет внедрение программы SAP на работу, участники программы суммарно на 27 % лучше понимают,

что данное ПО облегчает выполнение трудовых обязанностей, чем работники, не участвовавшие в программе. Этот вывод также подтверждается показателями *t*-критерия, выявляющими значимые различия в оценке респондентами качественной характеристики внедряемого элемента ERP системы SAP (рис. 4).

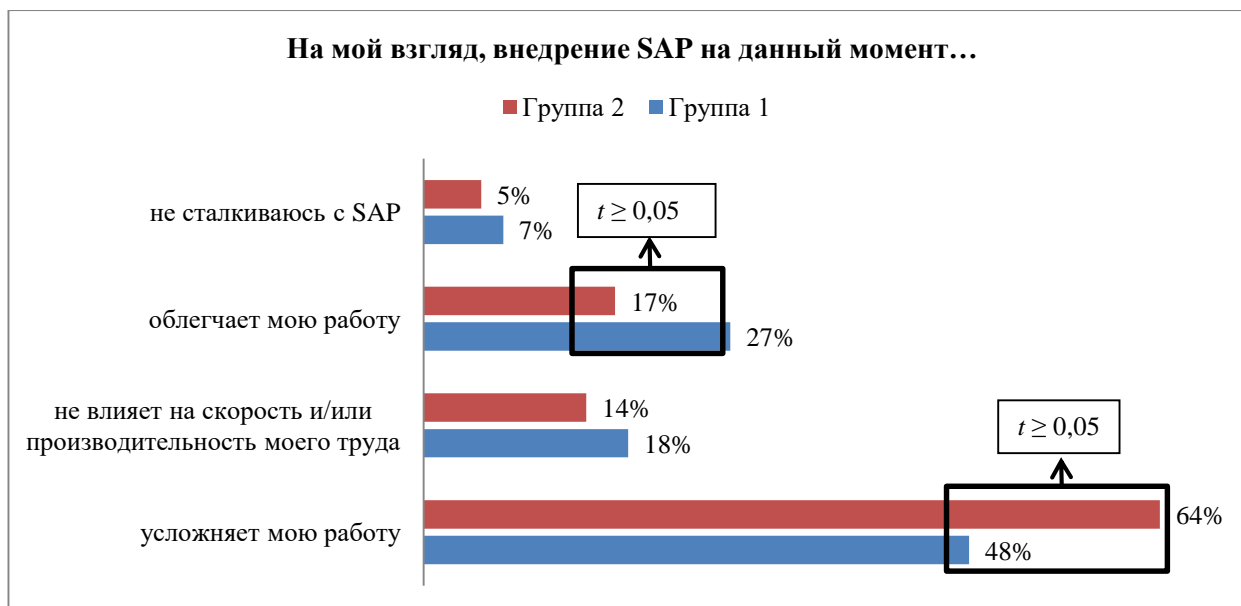


Рис. 4. Статистический анализ межгрупповых различий по критерию «Эффективность внедрения ИС SAP»

Fig. 4. Statistical analysis of intergroup differences based on the criterion "Efficiency of the ERP system SAP implementation"



Рис. 5. Статистический анализ межгрупповых различий по критерию «Достаточность образования»

Fig. 5. Statistical analysis of intergroup differences based on the criterion "Adequacy of education/training"

Также в анкете-опроснике был заложен ряд вопросов-индикаторов на оценку изменений ключевых компетенций по итогам программы. Вопросы о том, как повлияет внедрение SAP на эффективность труда, и о том, насколько готов работник преодолевать трудности, связанные с теми или иными изменениями, показательны для оценки такой компетенции, как «готовность к изменениям» и желание взять на себя ответственность за их внедрение, т.е. тех компетенций на развитие

которых была направлена программа. Кроме того, ответ на вопрос о том, достаточен ли уровень базового образования, полученного респондентами, для того чтобы эффективно работать в существующих условиях постоянных перемен, показал, что участники программы лучше осознают недостаточность образования, которое они получили в учебном заведении. *t*-критерий Стьюдента также показывает статистическую межгрупповую значимость в

полученных ответах и гарантирует, что работники, участвовавшие в программе, начали осознавать необходимость дополнительного образования и получения специализированных знаний для успешного функционирования в новых условиях (рис. 5).

Признание недостатка своего образования и знаний говорит о потенциально высоком уровне самосознания участников программы, в том числе о их готовности к непрерывному обучению и соответственно принятию всех изменений.

При сравнении компетенций на входе и на выходе были получены следующие результаты: работники, показавшие высокую степень готовности быть «проводниками изменений», – это те, кто выразил положительное мнение о повышении эффективности работы предприятия благодаря внедрению SAP и готовность преодолевать сложности, связанные с происходящими изменениям, в отличие от тех, кто сомневается в целесообразности SAP, а также тех, кто не готов прилагать дополнительные усилия и хочет работать только в рамках должностной инструкции.

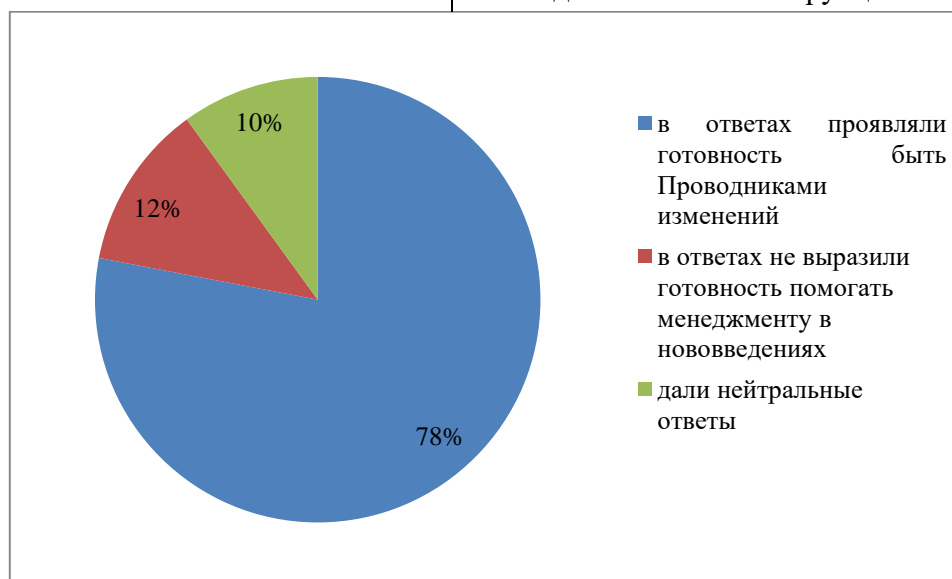


Рис. 6. Оценка готовности к изменениям по результатам реализации программы

Fig. 6. Assessment of the readiness for changes based on the program implementation results

Заключение

Проведенный анализ исследования, связанный с разработкой программы изменения компетенций работников ремонтной группы горно-обогатительной промышленности, и последующая апробация в реальных условиях перестройки производственно-ремонтного цикла позволили сделать вывод об успешности представленной программы изменения компетенций ИТР и о необходимости опережающего обучения, в частности, направленного на развитие компетенций, таких как «готовность к изменениям». Масштабное исследование на ПАО «Михайловский ГОК», в том числе и методами социологического опроса, статистического анализа и эксперимента позволило сделать вывод о

росте психологической готовности принять масштабные и локальные изменения в нескольких сферах производственного и сопутствующих процессов у работников, участвовавших в предлагаемых развивающих мероприятиях. Эти данные свидетельствуют о целесообразности вложения ресурсов производственных компаний в проактивное и опережающее развитие работников не только по профессиональным компетенциям, но и по компетенциям, формирующим работников, эффективно выполняющих роль «проводников изменений». Данные частично совпадают с результатами, полученными на основе мониторинга эффективности системы непрерывного образования [20].

Библиографический список

1. Mincer J. Investment in Human Capital and Personal Income Distribution. *Journal of Political Economy*. 1958;66(4):281–302.
2. Бек У. *Общество риска: на пути к другому модерну*. М.: Прогресс-Традиция; 2000. 102 с.
3. Слюсарев В. В., Хусяинов Т. М. Цифровая революция и экзистенциальный кризис личности. *Век глобализации*. 2018;4(28):145–151.
4. Mahmoodi M. A new multi-objective model of agile supply chain network design considering transportation limits. *Production & Manufacturing Research. An Open Access Journal*. 2019;7(5):1–22.
5. Коршунов И. А., Гапонова О. С., Пешкова В. М. *Век живи – век учись: непрерывное образование в России*. Под общ. ред. И. А. Коршунова, И. Д. Фрумина. М.: Издательский дом НИУ ВШЭ; 2019. 310 с.
6. Manninen J., Meriläinen M. *Benefits of lifelong learning: BeLL survey results*. Work Package Report, Project BeLL–Benefits for Lifelong Learning; 2014. URL: <https://www.bell-project.eu/cms/wp-content/uploads/2014/06/BeLL-Survey-results.pdf>
7. *Key competences for lifelong learning: European Reference Framework, Publications Office of the European Union*. URL: <https://www.erasmusplus.org.uk/file/272/download>.
8. Gregory J. B., Levy P. E. Employee coaching relationships: Enhancing construct clarity and measurement. *Coaching: An International Journal of Theory, Research and Practice*. 2010;(3):109–123.
9. Heslin P. A., Vandewalle D., Latham G. P. Keen to help? Managers' implicit person theories and their subsequent employee coaching. *Personnel Psychology*. 2006;59(4):871–902.
10. Heckman J., Stixrud J., Urzua S. The effects of cognitive and noncognitive abilities on labor market outcomes and social behavior. *Journal of Labor Economics*. 2006;24(3):411–482.
11. Чалдини Р. *Психология влияния*. 3-е изд. СПб., М., Харьков, Минск; 1999. 96 с. (Сер. «Мастера психологии»).
12. Kolski-Andreaco A. Motivating employees. How to engage your staff and create a more productive workforce. *Smart Business Pittsburgh*. 2014;21(6):16–19.
13. Kolski-Andreaco A., Tomlinson D. EAP Training for Managers: Shifting the Paradigm from Managing to Coaching. *EASNA Research Notes*. 2018;7(1):1–9.
14. Classification of learning activities (CLA). Eurostat Manual. *EU Publications Office*. Luxembourg; 2016. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/7659750/KS-GQ-15-011-EN-N.pdf>.
15. Leo De Vin. Karlstad lean factory: an instructional factory for game-based lean manufacturing training. *Production & Manufacturing Research*. 2017.;5(1):1019–1026.
16. Sultan Shahnaz, Morgan Rebecca L., Murad M. Hassan and cet. A Theoretical Framework and Competency-Based Approach to Training in Guideline Development. *Journal of General Internal Medicine*. 2020;35(2):561–567.
17. Wójcik, W., Kubekov B., cet. Project-competency based approach and the ontological model of knowledge representation of the planned learning. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2019;65(1):45–49.
18. Муратова И. А. Компетентностный подход и современные риски в контексте философии образования. *Общество: философия, история, культура*. 2019;(9):59–62.
19. Батыгин Г. С. Опыт построения типологии социальных показателей образа жизни. *Социологические исследования*. 1977;(2):141–147.
20. *Мониторинг непрерывного образования: инструмент управления и социологические аспекты*. Науч. рук. А. Е. Карпухина. М.: МАКС Пресс; 2006. 340 с. (Сер. «Мониторинг. Образование. Кадры»).

References

1. Mincer J. Investment in Human Capital and Personal Income Distribution. *Journal of Political Economy*. 1958;66(4):281–302.
2. Beck W. *Risk Society: Toward a Different Art Nouveau*. Moscow: Progress-Traditsiya Publ., 2000, 102 p. (In Russ.).
3. Slyusarev V. V., Khusyainov T. M. Digital revolution and existential crisis of personality. *The Century of Globalization*. 2018;4(28):145–151. (In Russ.).
4. Mahmoodi M. A new multi-objective model of agile supply chain network design considering transportation limits. *Production & Manufacturing Research. An Open Access Journal*. 2019;7(5):1–22.
5. Korshunov I. A., Gaponova O. S., Peshkova V. M. *You live and learn: lifelong education in Russia*. Korshunov I. A., Frumin I. D. (eds.) Moscow: NRU HSE Publishing House; 2019. 310 p. (in Russ.).

6. Manninen J., Meriläinen M. *Benefits of lifelong learning: BeLL survey results*. Work Package Report, Project BeLL–Benefits for Lifelong Learning; 2014. Available from: <https://www.bell-project.eu/cms/wp-content/uploads/2014/06/BeLL-Survey-results.pdf>.
7. *Key competences for lifelong learning: European Reference Framework, Publications Office of the European Union*. Available from: <https://www.erasmusplus.org.uk/file/272/download>.
8. Gregory J. B., Levy P. E. Employee coaching relationships: Enhancing construct clarity and measurement. *Coaching: An International Journal of Theory, Research and Practice*. 2010;(3):109–123.
9. Heslin P. A., Vandewalle D., Latham G. P. Keen to help? Managers' implicit person theories and their subsequent employee coaching. *Personnel Psychology*. 2006;59(4):871–902.
10. Heckman J., Stixrud J., Urzua S. The effects of cognitive and noncognitive abilities on labor market outcomes and social behavior. *Journal of Labor Economics*. 2006;24(3):411–482.
11. Chaldini R. *Psychology of influence*. 3rd ed. St Petersburg, Moscow, Kharkov, Minsk; 1999. 96 p. (Series "Masters of Psychology"). (In Russ.).
12. Kolski-Andreaco A. Motivating employees. How to engage your staff and create a more productive workforce. *Smart Business Pittsburgh*. 2014;21(6):16–19.
13. Kolski-Andreaco A., Tomlinson D. EAP Training for Managers: Shifting the Paradigm from Managing to Coaching. *EASNA Research Notes*. 2018;7(1):1–9.
14. Classification of learning activities (CLA). Eurostat Manual. *EU Publications Office*. Luxembourg; 2016. Available from: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3859598/7659750/KS-GQ-15-011-EN-N.pdf>.
15. Leo De Vin. Karlstad lean factory: an instructional factory for game-based lean manufacturing training. *Production & Manufacturing Research*. 2017.;5(1):1019–1026.
16. Sultan Shahnaz, Morgan Rebecca L., Murad M. Hassan and cet. A Theoretical Framework and Competency-Based Approach to Training in Guideline Development. *Journal of General Internal Medicine*. 2020;35(2):561–567.
17. Wójcik, W., Kubekov B., cet. Project-competency based approach and the ontological model of knowledge representation of the planned learning. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2019;65(1):45–49.
18. Muratova I.A. The competency-based approach and current risks in the context of education philosophy. *Society: philosophy, history, culture*. 2019;(9):59–62. (In Russ.).
19. Batygin G. S. The experience of developing typology of social indicators of lifestyle. *Sociological studies*. 1977;(2):141–147. (In Russ.).
20. *Lifelong education monitoring: a management tool and sociological aspects*. Academic Advisor A. E. Karpukhin. Moscow: MAKS Press Publ.; 2006. 340 p. (Series "Monitoring. Education. Human resources"). (In Russ.).