ISSN 0536-1028 (Print)
ISSN 2686-9853 (Online)

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII
GORNYI ZHURNAL
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

4
2020

Журнал распространяется по подписке Агентством «Роспечать», подписной индекс 70367.
Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), индексируется агрегатором научных ресурсов EBSCO Publishing, а также Международной базой изданий по наукам о Земле Georef.

Сведения о журнале публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».
Включен в реферативный журнал и базы данных ВИНИТИ РАН.
Электронные выпуски журнала размещены на порталах
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.ru (http://elibrary.ru),
компании «ИВИС» (http://ivis.ru)
и поисковой системы Google Shcolar (scholar.google.com).
Журнал доступен в электронно-библиотечной системе издательства «Лань»
(http://e.lanbook.com)
и электронно-библиотечной системе IPRbooks (http://www.iprbookshop.ru).

Журнал включен в «ПЕРЕЧЕНЬ РЕЦЕНЗИРУЕМЫХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЙ,
В КОТОРЫХ ДОЛЖНЫ БЫТЬ ОПУБЛИКОВАНЫ ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ
ДИССЕРТАЦИЙ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК,
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК»
(в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90-р)

В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей научных работников:

05.05.04 – Дорожные строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки), 05.05.06 – Горные машины (технические науки), 08.00.05 – Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности) (экономические науки), 25.00.13 – Обогащение полезных ископаемых (технические науки), 25.00.15 – Технология бурения и освоения скважин (технические науки), 25.00.16 – Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (технические науки), 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки), 25.00.18 – Технология освоения морских месторождений полезных ископаемых (технические науки), 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки), 25.00.21 – Теоретические основы проектирования горнотехнических систем (технические науки), 25.00.22 – Геотехнология (подземная, открытая и строительная) (технические науки), 25.00.35 – Геоинформатика (технические науки), 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки)

Тел: (343) 257-65-59 E-mail: gornij_journal@ursmu.ru

ISSN 0536-1028 (Print) ISSN 2686-9853 (Online)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издается с 1958 года

Выходит 8 раз в год **№ 4, 2020**

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

Е. Ф. ЦЫПИН, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Заместитель главного редактора

Ю. И. ЛЕЛЬ, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург

Редакционная коллегия

Валиев Н. Г. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Гордеев В. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Душин А. В. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Зелинская Е. В. *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск*
Игнатьева М. Н. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Калмыков В. Н. *Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск*
Картозия Б. А. *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
Кашников Ю. А. *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
Козин В. З. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Косарев Н. П. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Косолапов А. И. *Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*
Лапин Э. С. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Литвиненко В. С. *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург*
Мочалова Л. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Панкратенко А. Н. *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
Петров В. Л. *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
Пучков Л. А. *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
Рыльникова М. В. *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва*
Сёмин А. Н. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Стровский В. Е. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Шевченко Л. А. *Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово*
Яковлев В. Л. *Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург*

Иностранные члены редакционной коллегии

Битимбаев М. Ж. *Корпорация Казахмыс, г. Караганда, Республика Казахстан*
Дондов Д. *Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия*
Дребенштедт К. *Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Германия*
Пивняк Г. Г. *Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина*
Топалов С. Й. *Университет горного дела и геологии Св. Иоанна Рыльского, г. София, Болгария*
Трыбальский К. *Научно-технический университет им. С. Сташица, г. Краков, Польша*

© «Известия высших учебных заведений. Горный журнал», 2020

ISSN 0536-1028 (Print) ISSN 2686-9853 (Online)

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII

GORNYI ZHURNAL

Scientific and technical journal. First published in 1958

8 issues a year **No. 4, 2020**

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

E. F. TSYPIN, Ural State Mining University, Ekaterinburg

Deputy editor-in-chief

Iu. I. LEL, Ural State Mining University, Ekaterinburg

Editorial board

Valiev N. G. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Gordeev V. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Dushin A. V. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Zelinskaya E. V. *National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk*
Ignatieva M. N. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Kalmykov V. N. *Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov, Magnitogorsk*
Kartoziia B. A. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Kashnikov Iu. A. *Perm National Research Polytechnic University, Perm*
Kozin V. Z. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Kosarev N. P. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Kosolapov A. I. *Siberian Federal University, Krasnoiarsk*
Lapin E. S. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Litvinenko V. S. *St. Petersburg Mining University, St. Petersburg*
Mochalova L. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Pankratenko A. N. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Petrov V. L. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Puchkov L. A. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Rylnikova M. V. *Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, RAS, Moscow*
Semin A. N. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Strovskii V. E. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Shevchenko L. A. *Kuzbass State Technical University, Kemerovo*
Iakovlev V. L. *Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg*

International members

Bitimbaev M. Zh. *Kazakhmys Corporation LLC, Karaganda, Republic of Kazakhstan*
Dondov D. *Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia*
Drebenshtedt K. *TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany*
Pivniak G. G. *National TU Dnipro Polytechnic, Dnepropetrovsk, Ukraine*
Topalov S. I. *University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia, Bulgaria*
Trybalski K. *Scientific and Technical University named after S. Staszic, Krakow, Poland*

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. **Прогноз потенциальной удароопасности при реконструкции шахты «Юго-Западная» Дарасунского месторождения (In English)** 5

Миренков В. Е. **Трещина гидроразрыва в линейном поле напряжений** 12

ГОРНОПРОМЫШЛЕННАЯ И НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА

Арзамасцев Е. В., Астафьев П. Ф., Байдиков С. В., Коноплин А. Д., Ратушняк А. Н. **Индукционные зондирования слоистых структур** 21

Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Харисова О. Д. **Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника** 32

ГЕОИНФОРМАТИКА

Волков М. Н., Половов Б. Д., Прищепа Д. В. **Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций** 40

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Козин В. З., Комлев А. С. **Покусковой и многокусковой отбор точечных проб в теории опробования (In English)** 54

Морозов Ю. П., Пеньков П. М., Дмитриев В. Т. **Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией** 62

Умарова И. К., Аминжанова С. И., Салижанова Г. К., Каландаров К. С. **Технологические исследования на обогатимость полиметаллической руды месторождения Хандиза** 70

ЭКОНОМИКА И УПРАВЛЕНИЕ ГОРНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

Мочалова Л. А., Соколова О. Г. **Оценка социально-эколого-экономической результативности применения циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи полезных ископаемых (In English)** 80

Костарев А. С. **Оценка организационно-экономических отношений персонала в процессе инновационного развития угледобывающего производственного объединения** 90

ГОРНАЯ МЕХАНИКА. ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ТРАНСПОРТ

Юдин А. В., Шестаков В. С., Саитов В. И., Абдулкаримов М. К. **К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте** 99

БЕЗОПАСНОСТЬ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Заиров Ш. Ш., Худайбердиев О. Ж., Норматова М. Ж., Номдоров Р. У. **Разработка способов управления пылегазовым режимом при взрывании высоких уступов в глубоких карьерах** 113

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

Кардапольцева В. Н. **Гуманитарная составляющая в техническом вузе (на примере современной художественной литературы)** 122

ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

Поздравляем с юбилеем Голика Владимира Ивановича 134

Поздравляем с юбилеем Гальянова Алексея Владимировича 136

CONTENTS

GEOMECHANICS. DESTRUCTION OF ROCKS

Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. **Forecast of potential rockburst hazard during the reconstruction of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun deposit (In English)** 5

Mirenkov V. E. **Hydraulic fracture in the nonlinear stress field** 12

MINING AND OIL-AND-GAS GEOLOGY, GEOPHYSICS

Arzamastsev E. V., Astafiev P. F., Baidikov S. V., Konoplin A. D., Ratushniak A. N. **Inductive sounding of layered earth** 21

Melnik V. V., Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Kharisova O. D. **Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine** 32

GEOINFORMATICS

Volkov M. N., Polovov B. D., Prishchepa D. V. **Information technologies of geomechanical events integrated simulation** 40

MINERAL PROCESSING

Kozin V. Z., Komlev A. S. **Independent particle and lot selection of increment samples in the theory of sampling (In English)** 54

Morozov Iu. P., Penkov P. M., Dmitriev V. T. **Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization** 62

Umarova I. K., Aminzhanova S. I., Salizhanova G. K., Kalandarov K. S. **Khandiza polymetallic ore washability study** 70

ECONOMICS AND MINING PRODUCTION CONTROL

Mochalova L. A., Sokolova O. G. **Assessment of socio-eco-economic effectiveness of circular business models in mineral production** 80

Kostarev A. S. **Assessing personnel business relations in the process of innovative development at a coal mining production association** 90

MINING MECHANICAL ENGINEERING. MINING MACHINERY AND TRANSPORT

Iudin A. V., Shestakov V. S., Saitov V. I., Abdulkarimov M. K. **Determining the capacity of a bunker as a part of the handling system with combined transport** 99

MINING SAFETY

Zairov Sh. Sh., Khudaiberdiev O. Zh., Normatova M. Zh., Nomdorov R. U. **Developing the methods of controlling dust and gas conditions when blasting high benches in deep pits** 113

MINING HIGHER EDUCATION

Kardapoltseva V. N. Humanities in a technical institution of higher education (by the example of modern fiction) 122

HISTORY. INFORMATION. REVIEWS

Happy Anniversary to Vladimir I. Golik 134

Happy Anniversary to Aleksei V. Galianov 136

УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-5-11

Forecast of potential rockburst hazard during the reconstruction of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun deposit

Elena L. Sosnovskaia[1]*, Arkadii N. Avdeev[1]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Abstract

Research aim *is to study the geomechanical conditions of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun gold ore deposit during the reconstruction of mining to forecast the rockburst hazard.*

Methodology. *Laboratory tests of physical and mechanical properties of rocks were carried out. The initial stress-strain state of the rock mass was assessed by natural measurements and by solving the inverse geomechanical problem. The method of finite element analysis determined the technogenic stresses in the structural elements of the geotecnologies. Engineering calculations of critical depths of rockbursts were performed.*

Results and conclusions. *By results of researches it is established, that the natural field of in-situ stresses in the deposit array of rocks is distributed discretely: high-stress, medium-stress and off-load zones are distinguished. The rocks have high strength and elastic properties and are prone to brittle fracture. The actual mining has reached critical depth of rockburst. Air headings and ceiling are in the most hazardous state. To increase the safety of mining, a set of measures has been proposed: unloading roof ceiling and corners with slots, giving the roof a hipped shape, replacing the ceiling with a concrete pillar. It is recommended to conduct operational geomechanical monitoring at the mine.*

Key words: *initial and technogenic stress-strain state; gravitational and tectonic stresses; physical and mechanical properties of rocks; mine workings and pillars; geomechanical conditions; forecast of rockburst hazard.*

Acknowledgements. *The article has been prepared under the government contract no. 075-00581-19-00, theme no. 0405-2019-0007. Methodological fundamentals of zoning the territory of the Russian Federation by the risk of man-made natural disasters conditioned by modern geodynamic crustal movements at hazardous and unique facilities of subsoil use.*

Introduction. The ore field of the Darasun gold ore deposit is situated within the gold-molybdenum belt of Eastern Transbaikal. The deposit has complex tectonics, 9 joint systems were distinguished, basically running in the latitudinal, north-eastern and north-western orientation. 1 m thick rake quartz-sulphide lodes are mined bedded in quartz diorites, gabbro-diorites, amphibolites, and granodiorites. Basically, the method with ore shrinkage and ore preparation is used in the mine. Reserves in a layer are mined bottom-upwards; 3 m high ceiling is formed when cleaning up blocks. There are no intervening pillars. Lodes have significant strike dimensions, so the unsupported spans of goaf reach 200–300 m and more.

In the late 1970s in the course of actual mining at the Darasun mine, more than 36 instances of hazardous manifestation of rock pressure were registered. In 1979 the deposit was ranged as rockburst hazardous starting from the depth of 330m [1, 2].

In 2006 after the fire which resulted in the destruction and further flooding of a significant part of underground mine workings, mining at the Darasun mine was terminated. The mine is currently under reconstruction, and a section of the deposit, the Yugo-Zapadnaya mine, is recommissioned. Lower 607–717 m horizons were drained. Current depth of mining makes up 500–700 m.

In order to forecast the rockburst hazard of the rock mass, the geomechaniacl conditions at the lower horizons of the shaft under reconstruction were studied in 2019.

Table 1. Main physical and mechanical properties of rock at the Yugo-Zapadnaya mine
Таблица 1. Основные физико-механические свойства горных пород шахты «Юго-Западная»

Rock	Compressive strength, Mpa	Tension strength, MPa	Angle of shear resistance, degree	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Modulus of deformation, GPa	Deformation criterion of Ia. A. Bich, %
Granite	80.6	11.8	33	51.3	0.14	49.9	87.0
Quartz diorite	89.4	20.0	25	116.1	0.31	87.2	72.0
Peridotite	68.6	14.8	26	80.8	0.22	81.0	82.1
Beresite	52.5	8.8	30	67.2	0.22	62.6	87.8

Research material and methodology. In the course of research a complex of methods has been used including laboratory testing of physical and mechanical properties of rocks [3]; the estimation of rock mass initial stresses field with the in-situ measurements, slot relief according the methodology of the Institute of Mining UB RAS [4] and analytical estimation based on the inverse problems solution by the recorded manifestations of rock pressure [5]; finite-element modelling of technogenic stresses at the contour of the mine workings and pillars [6–9], engineering analysis of rockburst critical depths in hazardous elements of the underground structures [10–11].

Table 2. The results of measurements of the initial rock mass stresses at the Yugo-Zapadnaya mine
Таблица 2. Результаты измерений первоначальных напряжений массива горных пород на шахте «Юго-Западная»

Observation stations depth, m	Stresses, MPa		
	Vertical	Horizontal	
		longitudinal	transverse
507	–15.0±3.0	–14.8±4.5	–23.0±2.6
617	–16.7±1.4	–10.4±0.3	–9.3±1.6

Results. Evaluation of physical and mechanical properties of rocks. According to the results of laboratory testing of samples collected in May 2019 from the cores of the prospect holes and hand specimen, it has been determined that the rock of the lower horizons at the Yugo-Zapadnaya mine possess high elastic and strength properties (table 1). Deformation criterion of Ia. A. Bich is 71.95–90.48%, which is higher than the critical value of 70%. Rock can accumulate energy under pressure, i.e. are prone to brittle fracture in rockburst hazardous forms.

Evaluation of the initial stress field. In 2005–2006 the rockburst forecast and prevention service of OOO Darasunskii rudnik (Darasun mine Ltd) recorded

13 instances of dynamic manifestations of rock pressure at the horizons of 617, 667, 717 m of the Yugo-Zapadnaya mine. According to the recorded instances, initial stresses in highly rockburst hazardous section were analysed for the conditions of the Yugo-Zapadnaya mine based on the inverse geomechanical problem solution. The following has been obtained as per calculation. Medium vertical stresses are –19.4 MPa, horizontal stresses along the strike of the ore bodies are –56.8 MPa, and cross-line stresses are –43.6 MPa. Mean coefficient of the horizontal stress (the ratio between the horizontal and vertical stresses) at the sections of rock pressure dynamic manifestation is 2.7. This ratio is close to the earlier one determined according to the manifestations of rock pressure recorded in 1979–1991 at the Darasun mine, equal to 3.0 [5]. Mean tectonic component is –39.6 MPa (minus denotes rock contraction), which meets, within the accuracy of measurements, the value of tectonic stresses at rockburst hazardous sections of the Darasun mine [5].

It should be noted that after flooding and further draining of the excavations in 2018–2019 there were no signs of dynamic manifestations of rockburst hazard at the mine.

In June 2019 rock pressure observation stations were placed at the newly operated horizons of 507 m and 617 m at the Yugo-Zapadnaya mine, and initial stressed were evaluated by the method of slot relief (table 2) [12]. As a result of measurements it has been stated that at the horizon of 507 m at the Yugo-Zapadnaya mine which was not flooded, medium gravitational-tectonic stresses act. Minor stresses act vertically and are determined only by the weight of the superincumbent rock; the tectonic component is close to zero. Maximum stresses act across the strike of the ore lode. Horizontal stresses tectonic component makes up –9.6 MPa and –17.8 MPa correspondingly being close to the values of –12.9 MPa and –18.0 MPa which are average values with respect to the Darasun deposit [5]. The coefficient of the horizontal stress is 1.0 along the strike of the ore lode and 1.5 across the strike. These values are close to the specified values for the fields of natural stresses of lode gold ore fields of Eastern Siberia, 0.95 and 1.6 [11].

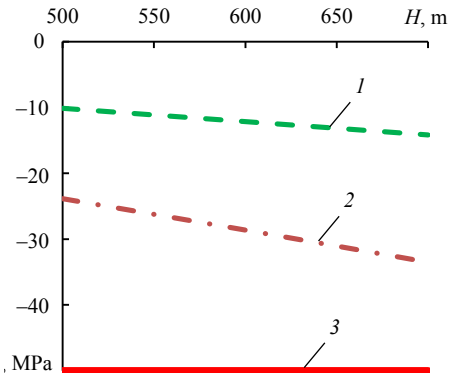


Fig. 1. Technogenic stresses in high-stress surrounding rocks of advanced headings:
H – mining depth; σ – stresses; *1* – the line of stresses in the walls of the roads; *2* – the line of stresses in the roof and roof corners; *3* – the line of permissible stresses

Рис. 1. Техногенные напряжения на контуре рудных штреков в высоконапряженных участках массива горных пород:
H – глубина горных работ; σ – напряжения; *1* – в стенках штреков, *2* – в кровле и углах кровли, *3* – линия допустимых напряжений

Initial stresses measurement results at the underlying horizon of 617 m differ significantly from the stresses at the horizon of 507 m. Vertical stresses still depend only on the response of the rock mass weight, their tectonic component is –0.1 MPa. Horizontal stresses are lower than the vertical ones, their tectonic component is –3.5…–4.6 MPa under the horizontal stress coefficient of 0.6–0.7. So, in the marginal mass of the horizon of 617 m, close-to-gravitational stresses act. The authors believe that it is due to the fact that all workings of the horizon of 617 m and the underlying horizons were flooded up to 2018. The mass apparently unloaded due to crack extension as a result of the multi-year hydraulic head.

Based on the above it can be concluded that at the Yugo-Zapadnaya mine the field of natural stress-strain state is of a discrete nature: both medium-stress zones of the

mass are distinguished which were not flooded and possess no apparent manifestations of rock pressure (hor. 507 and higher), and off-load zones of the marginal massif at the flooded horizons. High-stress zones are currently not determined at the functioning mining levels; in 2018–2019 hazardous manifestations of rock pressure were not recorded. However, with further development of mining at the shaft they apparently will show.

The analysis of technogenic stresses simulation in the structural elements of the development system makes it possible to note the following.

Table 3. Technogenic stresses in the ceiling pillars
Таблица 3. Техногенные напряжения в потолочине

Level of initial stresses	Mining depth *H*, м	Technogenic stresses, MPa		
		Length of goaf along the strike, m		
		50	100	200
Off-load mass	500	–23.3	–30.1	–33.6
	600	–28.0	–36.2	–40.4
	700	–31.9	–41.1	–45.9
Medium-stress mass	500	–73.2	–95.6	–107.3
	600	–87.9	–114.7	–128.7
	700	–101.3	–132.2	–148.4
High-stress mass	500	–137.3	–179.6	–201.6
	600	–164.7	–215.5	–241.9
	700	–192.1	–251.3	–282.1

The most stable elements of permanent mine workings in the studied conditions of the Yugo-Zapadnaya mine are the roof corners and the roof. Nevertheless, the stresses within, both in the medium-stress rock of hor. 507 m and in the off-load zones of hor. 617–717 m, are minor and do not exceed permissible compressive stresses by the dynamic manifestations of rock pressure (70% from rock compressive strength). It can be concluded that there are basically single drifts to the depths of 500–700 m, except for the local zones with high tectonic stress that will be stable and not rockburst hazardous.

At the air headings abutment the most hazardous are: at the off-load zones – roof corners, at the medium-stress zones – roof corners and walls; at the high-stress zones – roof and walls. The indicated zones will be unstable. The rated critical depth over rockburst here makes up 270 m. At the contour of the advanced headings, stresses do not exceed permissible values even under high tectonic stresses because the developed stope has the effect of relief on the countergangways (fig. 1). Advanced headings are in the stable and not rockburst hazardous state.

At the **ceiling** (arch pillar) of the stope, stresses exceed permissible values. The bigger the span of the goaf along the strike is, the higher will be the stresses at the arch pillar (ceiling) (table 3). The formed ceiling is the concentrator of increased technogenic stresses. The ceiling is at the unstable and potentially rockburst hazardous state at all depths under investigation.

The **walls of the goaf** are recorded to have significant tension stresses. So, when panel 50 m high, tension stresses have been recorded reaching +121…+164 MPa. Naturally, in real conditions, there will be no such focuses of tension stresses even in high-stress rockburst hazardous zones. Stope walls will destroy with the excavation of the ore body in the forms of intensive fracturing, flaking, detachment, and sometimes fall-off. The thickness of the collapse zone, however, does not depend of the span

of the goaf. Having reached the value of h = 4.5 m after the excavation of one panel, subsequently, under the general goaf span increase of 100 m and more, it will grow up to the values of L = 4.8–5.0 m (fig. 2). So, the collapse zone in the goaf walls with the working thickness of 1 m makes up from 3 to 5 m of lode working thickness. These results are well within the research of the specialists from OJSC Irgiredmed, who established the zone of displacement in the vicinity of the goaf equal to 4.5 thicknesses of the ore body for the conditions of 1 m thick narrow lodes excavation.

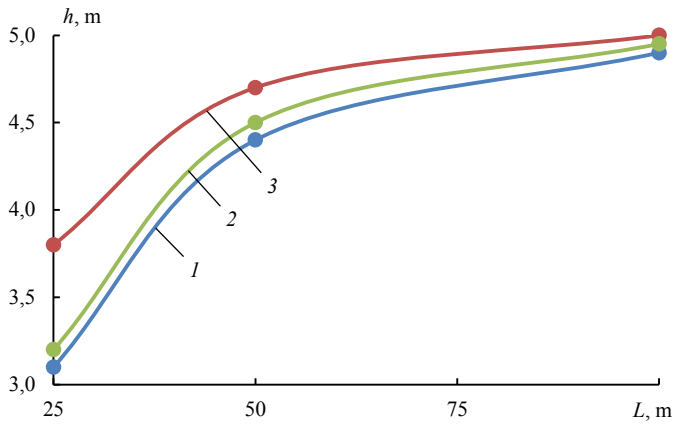


Fig. 2. Thickness of the crumbling layer in the walls of the goaf:
h – thickness of the crumbling layer; *L* – length of the goaf along strike of the lode; *1*, *2*, *3* – respectively off-load, medium and high-stress zones of the rock mass

Рис. 2. Толщина разрушающегося слоя в стенках выработанного пространства:
h – толщина разрушающегося слоя; *L* – пролет выработанного пространства по простиранию жилы; *1*, *2*, *3* – разгруженные, средненапряженные и высоконапряженные участки массива горных пород

Conclusions. Based on the research on the geomechanical conditions of the Yugo-Zapadnaya mine of the Darasun mine the following conclusions can be made.

It has been determined that the natural field of stresses in the rock mass of the mine is distributed discretely: at hor. 507 m and higher the field has the gravitational-tectonic character. At hor. 617 m and lower, off-load zones of gravitational stresses are situated. Rock and ore have high strength and elastic properties and are apt to accumulate energy under pressure being potentially rockburst hazardous.

The actual depth of mining has reached its critical values in rockburst pressure manifestation. Critical depth for the conditions of the Yugo-Zapadnaya mine is 460–600 m: 600 m at off-load and flooded zones, and 460 m in naturally dry zones.

Permanent mine workings and air headings are in potentially rockburst hazardous state. At the marginal massif of the hanging and the lower sides of the goaf, the zone of intensive shifts and cavings has been determined equal to 5 working zones of the lode, which makes up 5 m for the conditions of the narrow lodes at the Darasun deposit. The most hazardous structural element of the geotechnology is the ceiling.

To improve the safety of mining, a complex of measures is proposed: mine workings ceiling and roof corners relief by slots, hipped roof design, and replace the ceiling with an artificial pillar.

Considering the absence of the outer indicators of rockburst hazard after shaft draining in 2018, gravitational natural field of stresses at the lower horizons, the horizons of 507–717 m at the Yugo-Zapadnaya mine may currently be categorized as

"non-hazardous". Rock pressure is forecast basically in statistical forms of fracturing, flaking, detachment, and fall-off.

Considering recorded dynamic manifestations of rock pressure at the mine before the accident in 2006, high strength and elastic properties of rock ad ore, gravitational-tectonic character of natural stresses in flooded zones of the massif, high technogenic stresses in stope walls and ceiling together with the fact that the actual depth of mining at the Yugo-Zapadnaya mine has reached its critical values as for the dynamic manifestations of rock pressure, further development of mining may evidently face rock pressure manifestations in dynamic forms. In order to improve the safety of mining it is recommended to fulfill on-line geomechanical monitoring using visual and acoustic methods. At the most hazardous zones, i.e. in the vicinity of the tectonic faults, at the contacts of rock with different strength, superimposed mine workings, and in the zone of extraction influence, it is proposed that rock pressure observation stations should be placed.

REFERENCES

1. Sosnovskii L. I., Rashkin A. V., Garash Iu. Iu. Manifestations of rock pressure at great depths when carrying out underground works at the Darasun goldfield. In: *50 years anniversary of Transbaikal mines inspection: collected works*. St. Petersburg–Chita. p. 139–141. (In Russ.)

2. Neganov V. P. (ed.) *Goldfields development technique*. Moscow: Nedra Pushing; 1995. (In Russ.)

3. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Under the editorship of R. Ulusay, Springer International Publishing. Switzerland, Cham, 2015, 293 p.

4. Zubkov A. V. *Geomechanics and geotechnology*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2001. (In Russ.)

5. Sosnovskii L. I. Geoinformational model of the stress condition of Darasun gold ore deposit massive. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2007; 4: 61–64. (In Russ.)

6. Reddy J. N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.

7. Kattan P. I., Voyiadjis G. Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002. 113 p.

8. Wilhelm Rust. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 363 p.

9. Moatamedi M., Hassan A. Khawaja. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 154 p.

10. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. The forecast of potential rock bump hazard of steeply pitching lode gold ore deposits. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. *Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 2: 74–85. (In Russ.)

11. Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Control over the geomechanical processes at the goldfields of Eastern Siberia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 5: 21–29 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29

12. Avdeev A. N., Sosnovskaia E. L., Bolotnev A. Iu. Initial stress-strain state of the Yugo-Zapadnaya mine lower horizons. *Nauki o Zemle i nedropolzovanie = Technology and Engineering of Deposit Development*. 2019; 42 (3): 325–335. DOI: 10.25635/IM.2019.18.38241 (In Russ.)

Received 10 January 2020

Information about authors:

Elena L. Sosnovskaia – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: stress.igd@mail.ru
Arkadii N. Avdeev – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: avdeev0706@mail.ru

УДК 622.831 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-…-…

Прогноз потенциальной удароопасности при реконструкции шахты «Юго-Западная» Дарасунского месторождения

Сосновская Е. Л.[1], Авдеев А. Н.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН, Екатеринбург, Россия.

Реферат

Цель. *Исследование геомеханических условий шахты «Юго-Западная» Дарасунского месторождения при восстановлении горных работ с целью прогноза удароопасности.*

Методы. *Проведены лабораторные испытания физико-механических свойств горных пород. Натурными измерениями и путем решения обратной геомеханической задачи произведена оценка*

первоначального напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Методом конечно-элементного анализа определены техногенные напряжения в конструктивных элементах системы разработки. Проведены инженерные расчеты критических глубин по горным ударам.
Результаты и выводы. *По результатам исследований установлено, что естественное поле напряжений в массиве горных пород месторождения распределено дискретно: выделяются локальные участки повышенных тектонических напряжений, средненапряженные участки и разгруженные области приконтурного массива горных пород. Горные породы обладают высокими прочностными и упругими свойствами, склонны к хрупкому разрушению. Фактическая глубина горных работ достигла критических значений по горным ударам. В наиболее удароопасном состоянии находятся вентиляционные штреки и подштрековые целики. Для повышения безопасности горных работ рекомендуется комплекс мероприятий: разгрузка потолочины и углов кровли выработок щелями, придание кровле шатровой формы, замена потолочины искусственным целиком. На руднике рекомендуется проводить оперативный геомеханический мониторинг.*

Ключевые слова: *естественное и техногенное напряженно-деформированное состояние; гравитационные и тектонические напряжения; физико-механические свойства горных пород; горные выработки и целики; геомеханические условия; прогноз удароопасности.*

Статья подготовлена в рамках Госзадания № 075-00581-19-00. Тема № 0405-2019-0007. Методические основы районирования территории Российской Федерации по риску техноприродных катастроф, обусловленных современными геодинамическими движениями земной коры, на опасных и уникальных объектах недропользования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сосновский Л. И., Рашкин А. В., Гараш Ю. Ю. Проявления горного давления на больших глубинах при ведении подземных горных работ на Дарасунском золоторудном месторождении // 50 лет Горному надзору Забайкалья: сб. статей. СПб–Чита. С. 139–141.
2. Технология разработки золоторудных месторождений / под ред. В. П. Неганова. М: Недра, 1995. 336 с.
3. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007–2014. Under the editorship of R. Ulusay, Springer International Publishing. Switzerland, Cham, 2015, 293 p.
4. Зубков А. В. Геомеханика и геотехнология. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 335 с.
5. Сосновский Л. И. Геоинформационная модель напряженного состояния горного массива Дарасунского золоторудного месторождения // Маркшейдерия и недропользование. 2007. № 4. С. 61–64.
6. Reddy J. N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.
7. Kattan P. I., Voyiadjis G. Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002. 113 p.
8. Wilhelm Rust. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 363 p.
9. Moatamedi M., Hassan A. Khawaja. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 154 p.
10. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз потенциальной удароопасности крутопадающих жильных золоторудных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 2. С. 74–85.
11. Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Управление геомеханическими процессами на золоторудных жильных месторождениях Восточной Сибири // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 5. С. 21–29 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2019-5-21-29
12. Авдеев А. Н., Сосновская Е. Л., Болотнев А. Ю. Естественное напряженно-деформированное состояние нижних горизонтов шахты «Юго-Западная» Дарасунского рудного поля // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 43. № 3. С. 325–335. DOI: 10.25635/IM.2019.18.38241

Поступила в редакцию 10 января 2020 года

Сведения об авторах:

Сосновская Елена Леонидовна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: stress.igd@mail.ru
Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru

Для цитирования: Сосновская Е. Л., Авдеев А. Н. Прогноз потенциальной удароопасности при реконструкции шахты «Юго-Западная» Дарасунского месторождения // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 5–11 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-5-11
For citation: Sosnovskaia E. L., Avdeev A. N. Forecast of potential rockburst hazard during the reconstruction of the Yugo-Zapadnaya mine at the Darasun deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 5–11. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-5-11

УДК 622.83+539.3 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-12-20

Трещина гидроразрыва в линейном поле напряжений

Миренков В. Е.[1]
[1] Институт горного дела СО РАН, г. Новосибирск, Россия
e-mail: mirenkov@misd.ru

Реферат

Введение. *Рассматривается вариант прямолинейной конечной трещины, моделируемой математическим разрезом в упругой плоскости.*

Цель работы. *Предлагается новая модель трещины, отличающаяся от существующих тем, что зона разрушения вблизи вершины ограничивается упругим материалом, окружающим эту зону до момента прорастания трещины. Процесс разрушения существенно нелинейный.*

Методология. *В основу модели положены натурные эксперименты по растяжению эталонного образца из материала пород, вмещающих трещину, имеющих характерные точки по напряжениям: предел пропорциональности, предел упругости, область пластичности и область в окрестности разрушающих напряжений.*

Результаты. *Рассмотрена задача для трещины как эксперимент по определению развития процесса деформирования с ростом давления в трещине. Корректного аналитического решения этой задачи нет. Задача гидроразрыва предполагает наличие исходного поля напряжений в массиве пород, которое используется при формулировке граничных условий.*

Выводы. *Рассматриваемая задача принадлежит к классу задач Коши, области счета которых содержат бесконечно удаленную точку. В работе предлагается корректная постановка задач теории трещин в рамках статического, кинематического и динамического аспектов.*

Ключевые слова: *трещина; массив пород; граничные условия; напряжения; смещения; корректность.*

Введение. Известно много расчетов напряженно-деформированного состояния в окрестности трещины, моделируемой математическим разрезом. Приведем только некоторые из них [1–5]. Доказана их некорректность и нелинейность задачи в целом в [6]. В [2] определение напряженного состояния в окрестности очистной выработки сведено к известному решению для трещины. Попытка убрать бесконечные напряжения, имеющие место в вершинах трещины, предпринята в [2] введением в рассмотрение пластической области в призабойной части отрабатываемого пласта. Предполагалось, что напряжения в пластической области линейно убывают от значений на упруго-пластической границе до напряжений на забое, подтверждая известный экспериментальный факт о зоне опорного давления впереди забоя. Скачок нормальных напряжений на кромке пласта, неизбежный в такой ситуации, привел к логарифмической особенности при вычислении смещений. В основе механики разрушения и теории трещин лежит понятие коэффициента интенсивности напряжений, определяемого из некорректного решения для математического разреза. Продолжаются публикации работ [7–9], в которых вычисляются коэффициенты интенсивности напряжений и на их основе строится процесс разрушения пород. В последнее время много внимания уделяется рассмотрению трещин в пороупругой среде, что позволяет учесть влияние порового давления на поле напряжений [10], как считают авторы. Тем не менее все сводится к определению коэффициента интенсивности, т. е. к некорректному рассмотрению.

Хорошо известно [11–13], что при нагружении трещины происходит образование пор впереди трещины (доказанный экспериментально факт), но это не зна-

чит, что среда стала пороупругой. Зарождение и распространение трещин, учитывая предыдущий опыт, относится к числу таких проблем, актуальность которых не зависит от времени, что не позволяет поставить точку на проблеме. Прогресс в разработке все более тонких методов исследования микроструктуры материалов пород и механизма их разрушения протекает одновременно с ужесточением требований к условиям службы массива с трещиной. Кинетика накопления микродефектов в породе зависит от условий нагружения, размеров, структуры материала и т. п. Построение адекватной модели накопления микродефектов в породах – самостоятельная проблема, выходящая за рамки механики горных пород. Накопление таких микродефектов происходит преимущественно при растягивающих напряжениях и отсутствует при сжатии, когда материал пород деформируется как сплошной. В процессе деформирования образующиеся изолированные поры не растут и не взаимодействуют между собой до определенного значения их объемной концентрации. Прочность и долговечность остаются актуальными проблемами в разных областях знаний. Если рассматривать модели на основе микродефектов, то их реализация связана с необходимостью привлечения физических методов изучения структуры горных пород типа акустического, магнитного и др., а для практической реализации предложенной здесь модели достаточно использовать стандартные данные по основным механическим свойствам пород с дополнением этих данных значениями стандартных отклонений. Предсказать, что происходит в зоне нахождения пор без экспериментов не представляется возможным. На нынешнем уровне, к сожалению, невозможно выйти за рамки схематичного понимания вследствие недостатка экспериментальных данных и соответствующих теоретических разработок, в связи с этим в теории разрушения и теории трещин возникают проблемы.

Невесомый массив с трещиной. Остановимся на невесомом массиве пород с трещиной. Дополнительная задача, используемая при решении проблем механики, формулируется для невесомого массива. Будем считать в двумерном случае исходное поле напряжений в нетронутом массиве линейным, т. е.

$$\sigma_y = -\gamma\left(H - y\right); \qquad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \tag{1}$$

где σ_y, σ_x – вертикальная и горизонтальная составляющие напряжений; γ – удельный вес; λ – коэффициент бокового распора; H – глубина от дневной поверхности до точки будущей выработки. Предполагая рассмотрение конечной прямолинейной трещины, отнесем величины, имеющие размерность напряжений, к напряжениям, расклинивающим разрез, а смещений – к половине длины трещины.

Методология. Предлагаемая в работе модель существенно опирается на соотношения линейной теории упругости и если не совпадает с ней, то только для того, чтобы, опираясь на эксперимент, сформулировать ее основные положения, объясняющие и описывающие реальный процесс достаточно достоверно. Если подать в трещину давление σ_0, расклинивающее разрез (рис. 1), то берега разойдутся, и с ростом σ_0 наступит момент, когда $\sigma_0 = \sigma_{00}$ и произойдет прорастание трещины, т. е. разрыв материала пород, и длина увеличится на величину 2ε и станет равной $2 + 2\varepsilon$. В отсутствие аналитического решения классический (статический) подход рассматривает возможность численного счета аналогично [3–5], что позволяет определить область влияния трещины в породах $y \geq 0$ и $y \leq 0$, т. е. перейти к кинематическому аспекту (учету собственного веса пород). Динамику процесса нагружения трещины свяжем с ее прорастанием, т. е. с увеличением исходной длины и определением направления распространения, которое обеспечивается как статическим и кинематическим аспектами, так и исходным

полем напряжений. Феноменологическая теория учета собственного веса пород, сформулированная в [14], позволяет учесть не только влияние веса на смещения берегов трещины, но и уточнить характеристики горного массива.

Для исследования механических свойств материала производят эксперименты на одноосное растяжение образцов с получением диаграммы, связывающей напряжения и деформации. Трещина – такой же агрегат, позволяющий разрушить целенаправленно, с образованием полости раздела в сплошной среде, способной в определенных условиях раскрываться и закрываться, что важно в приложениях. Существенным здесь будет то, что горные породы плохо сопротивляются растяжению. Для трещины разрушение растяжением является аналогом разрушения при одноосном растяжении образца, изготовленного из материала пород, взятого из окрестности вершины трещины. Другими словами, в эпюре напряжений в окрестности вершины трещины σ_y для $|x| \geq 1$ максимальное значение будет равно разрушающему напряжению при растяжении образцов пород, т. е.

$$\sigma_y = \sigma_3 \approx 0{,}1\sigma_{сж},$$

где σ_3 – разрывное напряжение при одноосном растяжении образца; $\sigma_{сж}$ – разрушающее напряжение при сжатии пород.

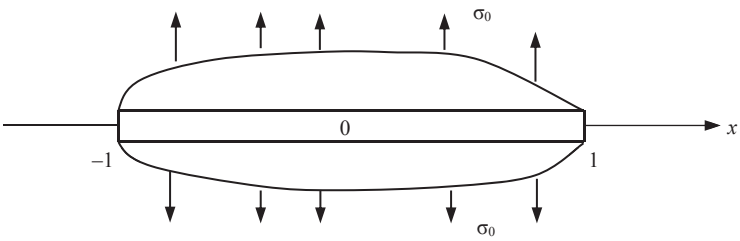


Рис. 1. Схема раскрытия трещины в невесомой плоскости при любом $\sigma_0 > 0$
Fig. 1. Schematic opening of fracture in weightless plane at any $\sigma_0 > 0$

Построение эпюры напряжения. Качественно эпюра *напряжения–деформации* (σ–ε) выглядит так, как на рис. 2. Возникает проблема поставить в соответствие эпюру σ–ε и области упругого, пластического и разрушаемого состояния одновременно для окрестности вершины трещины. Можно выделить напряжения и отвечающие им смещения, занимающие некоторые области, зафиксировав начало и конец этих областей. На рис. 2 выделено три области по значениям напряжений (их может быть больше, так обеспечивается возможность линейной аппроксимации отрезков диаграммы σ–ε). Учитывая, что эпюра нормальных напряжений впереди трещины имеет экстремальное значение $\sigma_{y\max}$ в точке $|x| = x_0 > 1$, и предполагая, что классическое решение [1, 2] совпадает с искомым для значений x, отвечающих пределу упругости пород, и имеет вид

$$\sigma_y = \frac{|x|}{\sqrt{x^2 - 1}} - 1, \tag{2}$$

будем считать, что классическое решение для трещины (2) совпадает с искомым решением на участке $x_1 \leq |x| < \infty$. Координата x_1 определяется из значения напряжений предела упругости, получаемого из рис. 2, подставим ее в выражение (2), т. е.

$$\sigma_1 = \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 - 1}} - 1,$$

откуда

$$x_1 = \sqrt{\frac{(\sigma_1 + 1)^2}{(\sigma_1 + 1)^2 - 1}},$$

где учтено, что величина σ_1 отнесена к σ_0, т. е. безразмерная. Примем, согласно [6], что в процессе деформирования вершины сместятся к центру трещины и займут положение $x = \pm\, в < 1$, т. е. участок $в \le x \le 1$ упругий, что подтверждается существованием максимального значения $\sigma_{y\max}$ в точке x_0. Как показано в [6], отнесение σ_0 к деформированному контуру трещины определяет $\sigma_y = 0$ в вершинах, т. е. вертикальная составляющая σ_0 имеет вид

$$Y = -\frac{\sqrt{в^2 - x^2}}{\sqrt{в^2 + \left[\left((\kappa + 1)/4\mu\right)^2 - 1\right]x^2}}, \tag{3}$$

где $\kappa = 3–4\beta$; $\mu = E[2(1 + \beta)]^{-1}$; β – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга. Равнодействующая усилий (3) для $0 \le x \le в$ равна $в$, как в классике, т. е. в обоих подходах напряжения σ_y на $0 \le |x| \le в$ различны при одинаковом главном векторе. При приближенном подходе к нелинейной проблеме будем ориентироваться на главный вектор.

Движение трещины остановится в точке x_0, так что $x_0 - в = \varepsilon$. Если ε известно из эксперимента, то координата $x_0 = в + \varepsilon$. Дальнейшее построение стандартно для конкретного массива пород. Если ε неизвестно, определим x_0 в первом приближении как середину отрезка $x_1 - 1$, т. е. $x_0 = 0{,}5(x_1 - 1)$. На рис. 2 выделим три численных значения напряжений: предел пропорциональности σ_1, среднее значение при нелинейном деформировании σ_2, разрушающее напряжение при растяжении σ_3. Перенесем эти напряжения на рис. 3. Разделим участки $x_0 \le |x| \le x_1$ и $1 \le |x| \le x_0$ на части пропорционально отношению $\varepsilon_1\varepsilon_2$ к $\varepsilon_2\varepsilon_3$ (рис. 2) и согласно этому делению получим на рис. 3 точки, обозначенные крестиками. Линейная аппроксимация приводит к эпюре напряжений $\sigma_y(x)$ для $в \le |x| \le x_1$ (рис. 3). Необходимо иметь экспериментальные данные по величине ε в натурных условиях, что определяет пору перед вершиной трещины, из которой начинается разрушение в направлении вершины; верно и обратное – знание координаты поры определяет ε.

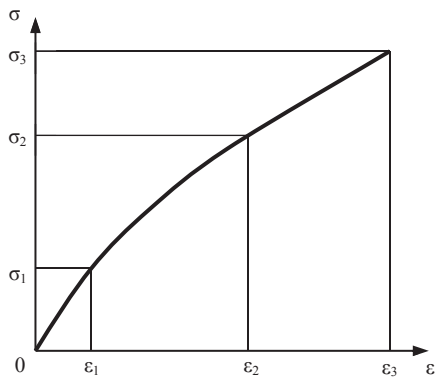


Рис. 2. Схематичная диаграмма напряжения–деформации (σ–ε) при одноосном растяжении пород

Fig. 2. Diagram of stresses and strains (σ–ε) under uniaxial tension of rocks

Очевидно, что наибольшее напряжение $\sigma_y(x)$ возникает на левой границе поры, и разрушение может начаться только здесь, в одной точке, и двинуться в направ-

лении вершины трещины. Здесь учтено, что $\sigma_{y\max}$ с ростом давления в трещине образует пору и при достижении значения σ_3 приводит к динамическому развитию разрушения образованного таким образом целика $в \le |x| \le x_0$. Рис. 3 характеризует процесс подготовки к прорастанию трещины (статика) без учета исходного поля напряжений пород. Распространение трещины в динамическом режиме требует повышения растягивающих напряжений до величины σ_3 на участке $в \le |x| \le x_0$, являющейся наименьшей из необходимых затрат давления на разрушение «целиков» $в \le |x| \le x_0$, другие процессы, сопровождающие динамику, не учитываются. Добавка растяжения на участке $в \le |x| \le x_0$ легко вычисляется по эпюре рис. 3. Очевидно, что и напряжение в трещине должно возрасти на соответствующую величину. Если идти обратно, имеем напряжение в трещине, достигающей предельной величины для обеспечения динамического разрушения (прорастания) на величину 2ε, когда напряжение падает до величины, определяемой эпюрой рис. 3, длина трещины уже новая и требует нового расчета эпюры и нового прорастания. По существу, нет динамики как таковой, а есть напряженное состояние в трещине на конец динамического движения (обеспечивающее прорастание), которое вычисляется из состояния, имеющего место до начала динамики (рис. 3).

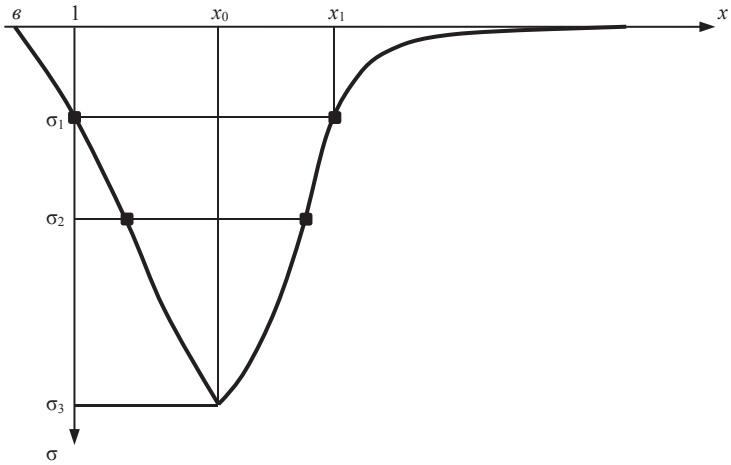


Рис. 3. Эпюра напряжений σ при $|x| \ge 1$
Fig. 3. Diagram of stresses σ at $|x| \ge 1$

Посчитав главный вектор растягивающих напряжений, представленных на рис. 3, получим соответствующие значения, характеризующие давление в трещине. Если начать уменьшать давление в трещине, то очевидно, что эпюра на рис. 3 станет убывать пропорционально убыванию давления в трещине. Сразу построить эпюру напряжений, аналогичную рис. 3, для малых давлений в трещине нельзя, так как предлагаемая модель основана на испытаниях на растяжение до разрушения образцов из материала пород, содержащего трещину, и только потом эпюру можно пропорционально уменьшать. По существу, решается дополнительная задача, при этом возможность нагружения трещины ограничена величиной σ_{00}, т. е. начнется динамика и прорастание. Разрез в невесомой плоскости раскрывается сразу, как бы мало не было $\sigma_0 > 0$.

Весомый массив пород с трещиной. В рамках классического подхода [1–5] численно рассчитывается напряженное состояние около трещины и подбирается теория, позволяющая определить ε – величину раскрытия трещины. В работе [6]

обсуждалось классическое решение для плоскости, ослабленной конечным прямолинейным разрезом, моделирующим трещину. Показана некорректность этого решения. Так как аналитического решения такой задачи нет, то придется обратиться к предлагаемой модели, реализуемой на рис. 3. Считаем, что трещина находится в поле силы тяжести пород (1). Область счета такой задачи содержит бесконечно удаленную точку и поэтому проблема попадает в класс задач Коши. Сжимающие усилия на берегах разреза в исходном состоянии

$$\sigma_y = \sigma_0 = const,$$

где σ_0 определяется из (1) при $y = 0$ и стоит задача раскрыть разрез. Предположим, что в трещину подали давление $\sigma_y = |\sigma_{10}| < |\sigma_0|$. Решаем дополнительную задачу для невесомого массива, сформулировав на трещине граничные условия в виде

$$\sigma_y = \sigma_{10}, \tag{4}$$

расклинивающих разрез. Посчитали напряженно-деформированное состояние, затухающее на бесконечности. Если на исходное поле напряжений наложить решение (4), то на разрезе останутся напряжения, закрывающие разрез:

$$\sigma_y = -\sigma_0 + \sigma_{10},$$

т. е. разрез не раскрылся.

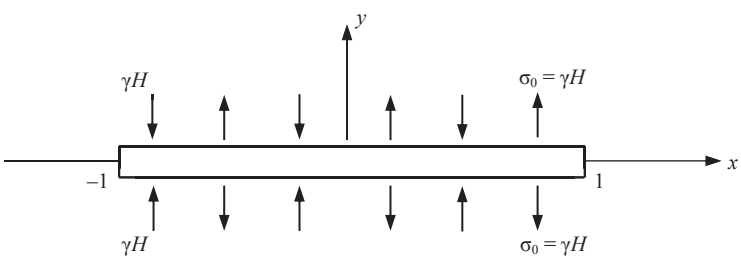


Рис. 4. Схема действия сжимающих напряжений нетронутого массива γH и давление в трещине $\sigma_0 = \gamma H$
Fig. 4. Compressive stresses γH in intact rock mass and the fracture pressure $\sigma_0 = \gamma H$

Рассмотрим, что же происходит в массиве по существу. При возрастании граничных условий от нуля до (7) параллельно действуют такие же усилия по модулю, закрывающие разрез, т. е. изменение напряженно-деформированного состояния равно нулю. Аналогичную ситуацию демонстрирует рис. 4. Пока $|\sigma_{10}| \le |\sigma_0|$, дополнительные решения нейтрализуются полностью, вплоть до случая их равенства. Если же

$$|\sigma_{10}| - |\sigma_0| = |\sigma_{20}| > 0,$$

то дополнительная задача формулируется на разрезе в виде

$$\sigma_y = \sigma_{20}.$$

Решение дополнительной задачи для невесомого массива (рис. 1) складывается с исходным полем напряжений (1), которому отвечают нулевые смещения всюду в породах.

Если конечная прямолинейная трещина расположена горизонтально в линейном поле (1), то для ее раскрытия необходимо приложить усилия

$$\sigma_0 = \gamma H + \sigma_{10}, \tag{5}$$

где σ_{10} – напряжения раскрытия трещины. Если граничные условия сформулированы в виде (5), то решение дополнительной задачи некорректно и расчет напряженно-деформированного состояния около разреза производить нельзя, так как поле смещений в результате будет отличаться от действительных смещений.

Рассмотрим процесс прорастания (увеличения длины) трещины при нагружении. Приложим на контуре разреза в массиве горных пород, сжатом усилиями γH (рис. 1), расклинивающие напряжения $\sigma_0 = \gamma H$. Получим равновесное состояние по смещениям, которые всюду тождественно равны нулю (если считать, что в массиве без ослабления смещения нулевые). На разрезе граничные условия в напряжениях нулевые. Для корректного решения проблемы (5) необходимо перейти к дополнительной задаче, когда на контуре трещины действуют только усилия σ_{10}, вызывающие раскрытие берегов. Увеличение σ_{10} приводит к ситуации, когда происходит разрушение материала пород в окрестности вершин разрывом, т. е. прорастание трещины при условии $\sigma_{10} \le \sigma_{00}$. Этот случай без учета исходного поля рассмотрен ранее. Если же необходимо учитывать исходное поле напряжений при прорастании трещины на величину 2ε, то на реализацию динамического разрушения, согласно рис. 4, необходимо увеличить давление в разрезе на величину

$$2\varepsilon(\sigma_3 + \gamma H), \tag{6}$$

являющуюся минимальной. Первое слагаемое (6) позволяет разорвать породы на участках 2ε, и на этих же участках второе слагаемое определяет нейтрализацию исходного поля напряжений γH.

Таким образом, доказано, что при численном вычислении напряженно-деформированного состояния около трещины собственный вес пород не учитывается. Необходимо рассматривать дополнительную задачу, которая позволяет определить область влияния трещины в полуплоскостях $y \ge 0$ и $y \le 0$ (рис. 1), найти смещения от собственного веса пород и уточнить исходное значение γH. В общем случае считаем, что на оси x имеет место сжатие пород усилиями σ_0 и растяжение напряжений σ_y на протяжении трещины, но тогда обязательно есть точка $x = в$, где $\sigma_y(в) = 0$. Интуитивно ясно, что при нагружении трещины усилиями σ_0 вершины сместятся навстречу друг другу, т. е. они выйдут из-под нагрузки (другого места для $|x| = в$ придумать нельзя), и в окрестности $x = в$ напряжения будут упругими до разрушения. Все решения о напряженно-деформированном состоянии около трещины, не использующие решение дополнительной задачи, некорректны. Для раскрытой трещины имеет смысл действие собственного веса пород. Любые сколь угодно малые напряжения, расклинивающие разрез, приводят к необходимости учета веса пород. Существенно, что при малых σ_0 область влияния трещины мала и соответственно малы и смещения от собственного веса.

Выводы. Рассмотрена конечная прямолинейная трещина в невесомом массиве пород (представляющая корректную дополнительную задачу в общем случае весомого массива) и процесс подготовки к ее прорастанию (разрушению). Сформулирована проблема расчета напряженно-деформированного состояния около

трещины в весомом горном массиве через решение дополнительной задачи, обеспечивающей существование, единственность и корректность формулировки. Предложена схема решения задачи о напряженном состоянии массива пород в окрестности трещины в нелинейной постановке теории упругости, в основу которой положен результат одноосного растяжения образца пород, вмещающих трещину. Реализация схемы возможна в линейной постановке.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00533).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fabrikant V. I. Relationship between contact and cras problems for generally anisotropic bodcies // Int. J. Eng. Sci. 2016. Vol. 102. P. 27–35.
2. Баренблатт Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках // Известия АН СССР. ОТН. 1955. № 11. С. 73–86.
3. Pan E., Chen W. Static Green's functions in anisotropic media. Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2015. 356 p.
4. Cresse O., Weng X., et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured fornations // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2013. Vol. 46. No. 4. P. 117–128.
5. Crosby D. G., Rahman M. M. Single and multiple transvers fracture initiation from horizontal wells // J. of Petroleum Cience and Engineering. 2002. Vol. 35. No. 3–4. P. 29–36.
6. Миренков В. Е. О некоторых задачах геомеханики // ФТПРПИ. 2018. № 3. С. 3–9.
7. Жорник А. И., Киричек В. А. Распространение трещины при кратковременном силовом воздействии // Известия РАН МТТ. 2018. № 6. С. 78–87.
8. Жуков Б. А. Асимптотический анализ плоского деформированного состояния, порожденного трещиной конечного продольного сдвига // Известия РАН МТТ. 2018. № 6. С. 118–127.
9. Salimzadeh S., Khalili N. A three-phase XFEM model for hydraulic fracturing with cohesive crack propagation // Computers and Geotechnics. 2015. Vol. 69. P. 82–92.
10. Курленя М. В., Миренков В. Е. Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. 2018. № 2. С. 3–9.
11. Азаров А. В., Курленя М. В., Сердюков С. В., Патутин А. В. Особенности развития трещин гидроразрыва вблизи свободной поверхности в изотропной пороупругой среде // ФТПРПИ. 2019. № 1. С. 3–11.
12. Смит Е., Кук Т., Рау К. Локализация пластического течения и трещиностойкость высокопрочных материалов // Механика разрушения. Разрушение конструкций. М.: Мир, 1980. Т. 20. С. 121–147.
13. Васильев А. Д., Моисеев В. Ф., Трефилов В. И. Фрактографические особенности хрупкого разрушения дисперсно-упрочненных материалов // Физика хрупкого разрушения: тр. 3-й Всесоюзн. конф. Киев, 1976. Ч. 1. С. 109–112.
14. Красовский А. Я., Надеждин Г. И. О физическом смысле температуры хрупкости // Физика хрупкого разрушения: тр. 3-й Всесоюзн. конф. Киев, 1976. Ч. 1. С. 50–55.

Поступила в редакцию 3 декабря 2019 года

Сведения об авторах:

Миренков Валерий Егорович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института горного дела СО РАН. E-mail: mirenkov@misd.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-12-20

Hydraulic fracture in the nonlinear stress field

Valerii E. Mirenkov[1]
[1] Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia.

Abstract

Introduction. *The article considers a variant of a straight finite fracture modeled by a mathematical cut in the elastic plane.*

Aim. *The new model proposed differs from the existing models by the damage zone bounded by the elastic material at the fracture tip up to the moment of the fracture growth. The process of fracturing is essentially nonlinear.*

Methodology. *The model is based on the full-scale tension experiments with a reference sample of rocks enclosing a fracture and having the characteristic stress points, namely, proportionality limit, elasticity limit, plasticity domain and the domain in the vicinity of destructive stresses.*

Results. *The problem with fracture is considered as an experiment to determine deformation with growing pressure in the fracture. The problem has no correct analytical solution. The problem on hydrofracture*

assumes the presence of the initial stress field in rock mass, which is essentially used in formulation of boundary conditions.
Conclusions. *All such problems belong to the class of Cauchy's problems with an infinitely distant point in the computational domain. This article proposes the correct formulation of the fracture theory problem in the static, kinematic and dynamic framework.*

Key words: *fracture; rock mass; boundary conditions; stresses; displacements; correctness.*

Acknowledgements. The research has been financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-05-00533).

REFERENCES

1. Fabrikant V. I. Relationship between contact and crack problems for generally anisotropic bodies. *Int. J. Eng. Sci*. 2016; 102: 27–35.
2. Barenblatt G. I., Khristianovich S. A. Roof falls in mines. *Izvestiia AN SSSR. OTN = Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Department of Technical Sciences*. 1955; 1: 73–86. (In Russ.)
3. Pan E., Chen W. Static Green's functions in anisotropic media. Cambridge University Press; 2015.
4. Cresses O., Weng X., et al. Numerical modeling of hydraulic fractures interaction in complex naturally fractured formations. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2013; 46 (4): 117–128.
5. Crosby D. G., Rahman M. M. Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells. *J. of Petroleum Science and Engineering*. 2002; 35 (3–4): 29–36.
6. Mirenkov V. E. Ill-posed problems of geomechanics. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2018; 54 (3): 361–367. (In Russ.)
7. Zhornik A. I., Kirichek V. A. Crack propagation under the pulsed loads. *Izvestiia RAN MTT = Mechanics of Solids*. 2018; 53 (6): 664–674. (In Russ.)
8. Zhukov B. A. Asymptotic analysis of the plane strain state generated by a finite longitudinal shear crack. *Izvestiia RAN MTT = Mechanics of Solids*. 2018. Vol. 53. No. 6. pp. 698–706. (In Russ.)
9. Salimzadeh S., Khalili N. A three-phase XFEM model for hydraulic fracturing with cohesive crack propagation. *Computers and Geotechnics*. 2015; 69: 82–92.
10. Kurlenia M. V., Mirenkov V. E. Phenomenological model of rock deformation around mine workings. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Scienc*e. 2018; 54 (2): 181–186. (In Russ.)
11. Azarov A. V., Kurlenia M. V., Serdiukov S. V., Patutin A. V. Features of hydraulic fracturing propagation near free surface in isotropic poroelastic medium. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2019; 55 (1): 1–8. (In Russ.)
12. Smith E., Cook T. S., Rau C. A. Flow localization and fracture toughness of high strength materials. In: *Fracture mechanics. Structural damage*. Moscow: Mir Publishing; 1980. p. 121–147. (In Russ.)
13. Vasiliev A. D., Moiseev V. F., Trefilov V. I. Fractographic features of brittle fracture of disperse reinforced materials. In: *Physics of Brittle Fracture: III All-Union Conference Proceedings*. Kiev: 1976. Part I. p. 109–112. (In Russ.)
14. Krasovskii A. Ia., Nadezhdin G. I. Physical sense of brittleness temperature. In: *Physics of Brittle Fracture: III All-Union Conference Proceedings*. Kiev: 1976. Part I. p. 50–55. (In Russ.)

Received 3 December 2019

Information about authors:

Valerii E. Mirenkov – DSc (Engineering), Professor, senior researcher, Institute of Mining SB RAS. E-mail: mirenkov@misd.ru

Для цитирования: Миренков В. Е. Трещина гидроразрыва в линейном поле напряжений // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 12–20. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-12-20
For citation: Mirenkov V. E. Hydraulic fracture in the nonlinear stress field. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 12–20 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-12-20

УДК 550.837 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31

Индукционные зондирования слоистых структур

Арзамасцев Е. В.[1], Астафьев П. Ф.[1], Байдиков С. В.[1], Коноплин А. Д.[1], Ратушняк А. Н.[1]*

[1] Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: geo_info@mail.ru

Реферат

Цель работы. *Конечным результатом исследований является разработка технологии проведения непрерывного многочастотного индукционного профилирования с измерением составляющих магнитного поля на протяженных трассах исследований и детализация участков с помощью дистанционных индукционных зондирований.*

Методика проведения исследований. *Теоретические и экспериментальные исследования закономерностей изменения составляющих магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя над неоднородным слоистым разрезом. Математическое моделирование магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя в слоистой неоднородной среде.*

Анализ результатов. *Показана информативность характеристик составляющих магнитного поля гармонического вертикального магнитного диполя в низкочастотной зоне индукции при исследовании неоднородных геоэлектрических разрезов и соответствие получаемых результатов типу неоднородного разреза при дистанционных индукционных зондированиях.*

Область применения результатов. *Для протяженных участков исследований трасс (автомобильные и железные дороги, нефте- и газопроводы, линии электропередач и т. д.) определена технологическая последовательность измерений характеристик магнитного поля вертикального магнитного диполя для определения геоэлектрических свойств слоистого разреза путем проведения непрерывного многочастотного профилирования, определения однородных участков строения среды и их детализация путем дискретных исследований методом индукционных дистанционных зондирований.*

Ключевые слова: *гармоническое электромагнитное поле; индукционные зондирования; вертикальный магнитный диполь; кажущееся электрическое сопротивление.*

Введение. Индукционные зондирования, несмотря на более сложную техническую реализацию по сравнению с электрическими зондированиями, имеют ряд преимуществ благодаря бесконтактным способам возбуждения и измерения магнитного поля. Вопросам применения индуктивных методов зондирования с вертикальным магнитным диполем (ВМД) над слоистой средой посвящено значительное количество работ. Анализ закономерностей поведения магнитного поля позволяет определить их информативные характеристики при наиболее технически простых модульных измерениях составляющих поля, отражающих строение слоистой среды по удельному электрическому сопротивлению [1–3]. Практическое применение индукционных зондирований при исследованиях слоистых сред показывает, что в вопросах теории, методики проведения и интерпретации получаемых результатов еще остается ряд вопросов, исследованию которых посвящена настоящая работа.

Если магнитный диполь с гармоническим режимом тока и моментом $M_z^* = JSn$ (J – сила тока; Sn – площадь диполя), направленным по нормали к границе

земля–воздух, приподнят на высоту d над поверхностью проводящего немагнитного полупространства, то для точек в верхнем непроводящем полупространстве $z \geq 0$ составляющие напряженности магнитного поля на высоте точки измерений z имеют вид [1–3]:

$$H_z = -\frac{M_z^*}{4\pi}\left(\frac{1}{R^3} - \int_0^\infty \lambda^2 \alpha \exp\left(-\lambda(z+d)\right) J_0(\lambda r) d\lambda\right); \quad (1)$$

$$H_r = \frac{M_z^*}{4\pi}\int_0^\infty \lambda^2 \alpha \exp\left(-\lambda(z+d)\right) J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (2)$$

где λ – параметр разделения переменных в функции Бесселя; r – расстояние от диполя до точки измерений.

Для нижнего полупространства, характеризуемого набором слоев с различными удельными электропроводностями, различия в формулах для расчета магнитного поля (1) и (2) будут отличаться от полупространства только коэффициентом α, определяемым частотой тока в диполе, проводящими свойствами слоев и глубиной их положения.

Полупространство. Для нижнего полупространства с удельной электропроводностью σ коэффициент α равен [1, 2]

$$\alpha = \left(\lambda - m\right) / \left(\lambda + m\right),$$

где $m = \sqrt{\lambda^2 + k^2}$; $k^2 = j\omega\mu_0\sigma$.

Если магнитный диполь и точка наблюдений расположены на границе *земля–воздух* ($d = 0$ и $z = 0$), составляющие напряженности поля (1), (2) с помощью интегралов Зоммерфельда и Фостера выражаются через элементарные и специальные функции в виде [3]

$$H_z = -\frac{M_z^*}{4\pi r^3}\frac{2}{jp}\left\{9 - \left[9 + 9\sqrt{jp} + 4jp + jp\sqrt{jp}\right]\exp\left(-\sqrt{jp}\right)\right\}; \quad (3)$$

$$H_r = \frac{M_z^*}{4\pi r^3}\left\{8 - 8\sqrt{jp}I_1K_0 + jpI_0K_0 - \left[16 + jp\right]I_1K_1\right\}, \quad (4)$$

где I_0, I_1 – модифицированные функции Бесселя; K_0, K_1 – функции Макдональда нулевого и первого порядков от аргумента $\sqrt{jp}/2$, безразмерный волновой параметр p определен как $jp = k^2r^2 = j\omega\mu_0\sigma r^2$.

Для индукционной (ближней) зоны составляющая поля H_z от волнового параметра среды p практически не зависит, оставаясь близкой к значению постоянного тока $H_z = -M_z^*/(4\pi r^3)$ вплоть до значений $p < 1$. При этом составляющая поля H_r изменяется прямо пропорционально волновому параметру среды до значений, близких $p = 1$. Это позволяет по величине отношения составляющих поля определить волновой параметр среды из соотношения $|H_z|/|H_r| = 4/p$ и кажущееся удельное электрическое сопротивление проводящего полупространства из

соотношения $p = \omega\mu_0 r^2 / \rho$ [4]. Аналогичную зависимость ρ_k от волнового параметра среды имеет отношение большой H_a и малой H_b осей эллипса поляризации магнитного поля $|H_a|/|H_b|$, поскольку оно является эквивалентной характеристикой [5]. Для расширения диапазона исследований при использовании высоких частот для низкоомных сред при значениях волнового параметра $p > 1$ в работе [6] предложено при определении ρ_k использовать дополнительный нормирующий параметр D к низкочастотной асимптотике

$$\rho_к = 2 \cdot 10^{-6} Dfr^2 |H_z|/|H_r|. \quad (5)$$

Величина параметра D наилучшим образом аппроксимируется формулой $D = \exp(-1{,}28|H_r|/|H_z|)$, что позволяет существенно расширить диапазон дистанционных индукционных исследований с вертикальным магнитным диполем [7].

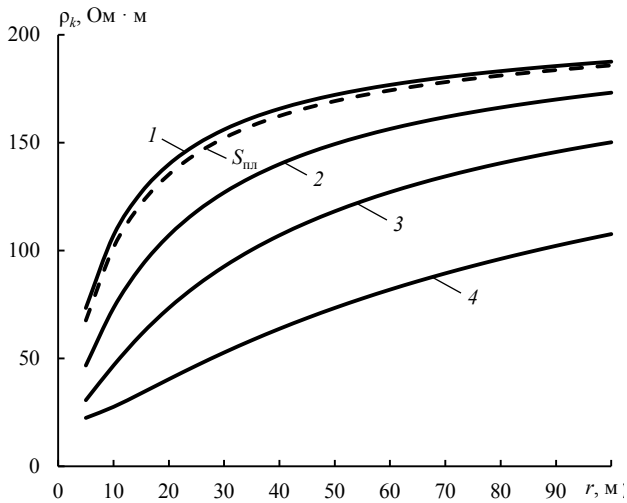


Рис. 1. Разрез типа *проводник–диэлектрик*:
ρ_1 = 20 Ом · м; ρ_2 = 200 Ом · м; f = 100 Гц; $S_{пл}$ – S-плоскость;
1 – h = 0,5 м; *2* – h = 1 м; *3* – h = 2 м; *4* – h = 5 м
Fig. 1. Conductor-dielectric section:
ρ_1 = 20 Ω · m; ρ_2 = 200 Ω · m; f = 100 Hz; S_{pl} – S-plane; *1* – h = 0.5 m;
2 – h = 1 m; *3* – h = 2 m; *4* – h = 5 m

Для каждой точки измерений составляющих магнитного поля на заданной дискретной частоте f при различных разносах r_i от вертикального магнитного диполя можно построить зависимость кажущегося удельного сопротивления проводящего полупространства ρ_k, подобную типам кривых вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) над слоистой средой.

Поскольку алгоритм решения задач для слоистых сред описан во множестве научных работ, например [2, 3, 8, 9], остановимся на результатах решений, описываемых коэффициентом α в формулах (1) и (2).

Двухслойная среда. Для случая, когда под границей *земля–воздух* есть слой мощностью h с удельной электропроводностью σ_1, а подстилающая среда имеет удельную электропроводность σ_2, коэффициент α имеет вид [1–3]:

$$\alpha = \frac{(\lambda - m_1)(m_1 + m_2) + (\lambda + m_1)(m_1 - m_2)\exp(2m_1 h)}{(\lambda + m_1)(m_1 + m_2) + (\lambda - m_1)(m_1 - m_2)\exp(2m_1 h)}, \quad m_i = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_i}. \quad (6)$$

Проводящая S-плоскость на границе земля–воздух. Если слой 1 обладает высокой электропроводностью $\sigma_1 >> \sigma_2$ и его толщина $h << r$, то при $\sigma_1 \to \infty$ и $h \to 0$ их произведение $\sigma_1 \cdot h = S$ имеет размерность продольной проводимости (См) и коэффициент α принимает вид

$$\alpha = \frac{\lambda - m_2 - j\omega\mu_0 S}{\lambda + m_2 + j\omega\mu_0 S}. \tag{7}$$

Это решение получено при использовании разрывных граничных условий для магнитного поля на *S*-плоскости [10].

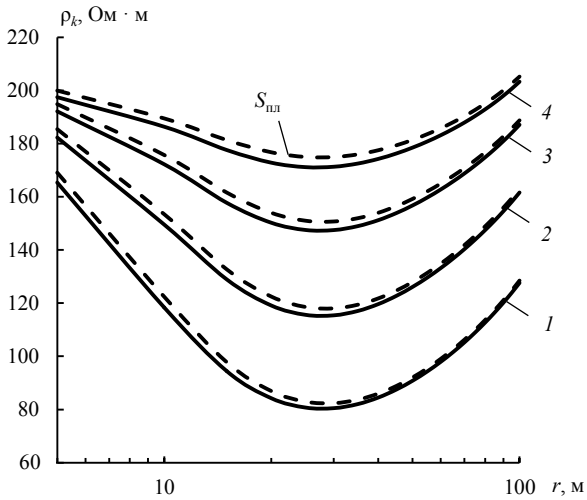


Рис. 2. Тип *H*:
$\rho_1 = \rho_3 = 200$ Ом · м; $h_1 = 10$ м; $d_2 = 0{,}5$ м; $f = 1$ кГц;
$S_{пл}$ – *S*-плоскость; *1* – $\rho_2 = 2{,}5$ Ом · м; *2* – $\rho_2 = 5$ Ом · м;
3 – $\rho_2 = 10$ Ом · м; *4* – $\rho_2 = 20$ Ом · м
Fig. 2. N-type:
$\rho_1 = \rho_3 = 200\ \Omega \cdot$ m; $h_1 = 10$ m; $d_2 = 0.5$ m; $f = 1$ kHz;
S_{pl} – S-plane; *1* – $\rho_2 = 2.5\ \Omega\cdot$m; *2* – $\rho_2 = 5\ \Omega \cdot$ m;
3 – $\rho_2 = 10\ \Omega \cdot$ m; *4* – $\rho_2 = 20\ \Omega \cdot$ m

Трехслойная среда. Для случая, когда нижняя среда характеризуется набором из трех слоев с глубинами нижних кромок и удельными электропроводностями h_1, h_2 и σ_i; $k_i^2 = j\omega\mu_0\sigma_i$, где *i* – номер слоя (*i* = 1, 2, 3), коэффициент α имеет вид, подобный приведенному в работе [1]:

$$\begin{aligned}\alpha = [&\left(R_{01}M_{12} + M_{01}R_{12}\exp(2m_1h_1)\right)M_{23}\exp(2m_2h_1) + \left(R_{01}R_{12} + M_{01}M_{12}\exp(2m_1h_1)\right)\times \\ &\times R_{23}\exp(2m_2h_2)] / [\left(M_{01}M_{12} + R_{01}R_{12}\exp(2m_1h_1)\right)M_{23}\exp(2m_2h_1) + \\ &+\left(M_{01}R_{12} + R_{01}M_{12}\exp(2m_1h_1)\right)R_{23}\exp(2m_2h_2)],\end{aligned} \tag{8}$$

где $R_{01} = \lambda - m_1$; $R_{12} = m_1 - m_2$; $R_{23} = m_2 - m_3$; $M_{01} = \lambda + m_1$; $M_{12} = m_1 + m_2$; $M_{23} = m_2 + m_3$. В частном случае $h_1 = h_2$, $\sigma_2 = \sigma_3$ ($R_{23} = 0$) и $h_1 = 0$, $\sigma_1 = 0$ ($R_{01} = 0$) коэффициент α соответствует выражению (6) для двухслойной среды.

Отметим особо, что выражение (8) не сводится к рекуррентному виду, выражаемому через гиперболические функции, как это выполнено методом аналогии для слоистой среды с источником в виде горизонтального электрического диполя [11].

Погруженная проводящая S-плоскость. Если слой 2 обладает высокой электропроводностью $\sigma_1 << \sigma_2 >> \sigma_3$ и малой толщиной $d_2 = h_2 - h_1$, т. е. $r >> d_2 << h_1$, то при $\sigma_2 \to \infty$ и $d_2 \to 0$ их произведение $\sigma_2 \cdot d_2 = S$. Коэффициент α может быть получен из разрывных граничных условий для магнитного поля, пересекающего границу с поверхностным током [10]:

$$\alpha = \frac{R_{01}(M_{13} + j\omega\mu_0 S) + M_{01}(R_{13} - j\omega\mu_0 S)\exp(2m_1 h)}{M_{01}(M_{13} + j\omega\mu_0 S) + R_{01}(R_{13} - j\omega\mu_0 S)\exp(2m_1 h)}. \quad (9)$$

Аппроксимация тонкого проводящего слоя *S*-плоскостью позволяет уменьшить число расчетных параметров для моделей, соответствующих проводящему погруженному слою и разрезу типа *H*. Кроме того, решение задачи с погруженной *S*-плоскостью позволяет сопоставить получаемые расчеты с результатами, полученными с использованием коэффициента α для тонкого проводящего слоя, определяемого формулой (8), или для трехслойной среды, полученными по рекуррентной формуле, предложенной в работе [11].

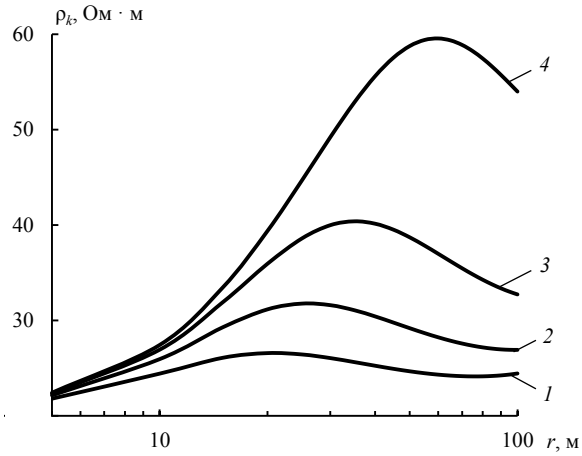


Рис. 3. Тип *K*:
$\rho_1 = \rho_3 = 20$ Ом · м; $\rho_2 = 200$ Ом · м; $d_1 = 5$ м; $f = 100$ Гц;
1 – $d_2 = 5$ м; *2* – $d_2 = 10$ м; *3* – $d_2 = 20$ м; *4* – $d_2 = 50$ м
Fig. 3. K-type:
$\rho_1 = \rho_3 = 20\ \Omega \cdot$ m; $\rho_2 = 200\ \Omega \cdot$ m; $d_1 = 5$ m; $f = 100$ hz;
1 – $d_2 = 5$ m; *2* – $d_2 = 10$ m; *3* – $d_2 = 20$ m; *4* – $d_2 = 50$ m

Выражение для коэффициента α для среды из четырех слоев с различными глубинами нижних кромок и удельными электропроводностями приведено в работе [1].

Расчеты магнитного поля ВМД над слоистой средой. Для расчета составляющих напряженностей магнитного поля, создаваемого переменным вертикальным магнитным диполем над слоистой средой, создано программное обеспечение для расчета поля на дискретном спектре частот от 10^1 до 10^5 Гц при различных разносах диполя и точек наблюдений. Программирование выполнено на языке FORTRAN стандарта Fortran-90 с использованием пакета Fortran Power Station 4.0 и программного комплекса Wolfram Mathematica 7. Сопоставление получаемых результатов показывает, что необходимая точность проводимых вычислений преобразований Ханкеля с функциями Бесселя по формулам (1), (2) с помощью цифрового фильтра Андерсона достигается при малых, но ненулевых значениях

показателя степени ($z + d$) [12]. По выходным данным комплексных составляющих поля H_z и H_r вычисляются отношение модулей составляющих $|H_z|/|H_r|$, фазовые углы и характеристики эллиптически поляризованного магнитного поля по формулам, приведенным в работе [5].

Тестирование созданного программного обеспечения выполнено при расчете магнитного поля ВМД в частном случае однородного полупространства, выражаемом через аналитические и специальные функции (3) и (4), представленное в работе [8] в виде таблиц значений компонент поля и их отношений в зависимости от волнового параметра среды p.

Двухслойная среда. Для типичного разреза типа *проводник–диэлектрик* результаты расчета кажущегося электрического сопротивления по формуле (5) приведены на рис. 1 для различных мощностей слоя, включая случай пласта малой мощности (S-плоскость).

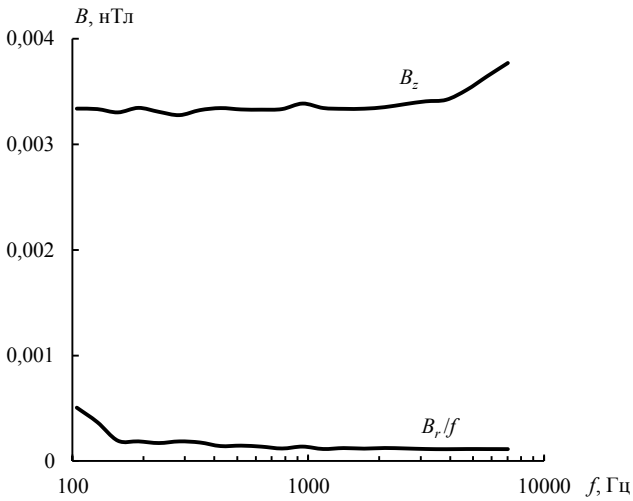


Рис. 4. Составляющие B_z и B_r/f при частотном зондировании $r = 20$ м с вертикальным магнитным диполем с моментом $M_z = 0{,}52$ А · м^2

Fig. 4. B_z and B_r/f components under frequency sounding $r = 20$ m with vertical magnetic dipole with the magnetic moment $M_z = 0.52$ A · m^2

Как видно из приведенных кривых, ρ_k с увеличением расстояния от источника изменяется от сопротивления, близкого к истинному значению верхнего слоя при $r \to 0$, к сопротивлению основания среды. Типы кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях (ДИЗ) на фиксированной частоте соответствуют типам двухслойного разреза. Полученные результаты соответствуют расчетам, приведенным в работах [6, 13, 14]. Расчеты магнитного поля по формулам (1), (2) с коэффициентом α для тонкого проводящего пласта (формула (6)) соответствуют расчетам поля с S-плоскостью на границе *земля–воздух* (7), на рис. 1 представлено для тонкого пласта мощностью 0,5 м при $\rho_1 = 20$ Ом · м, что дает величину продольной проводимости $S = 0{,}025$ См.

Типы трехслойных кривых ДИЗ. Расчеты составляющих магнитного поля по формулам (1)–(2) разреза типа H для погруженного проводящего пласта малой мощности $d_2 = 0{,}5$ м (штриховые линии) для случая α, описываемого формулой (8), соответствуют расчетам поля с погруженной проводящей S-плоскостью (сплошные линии) для случая α, описываемого формулой (9) для набора значений удельного электрического сопротивления пласта ρ_2 (рис. 2).

Полученные закономерности поведения кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях на фиксированной частоте соответствуют расчетам поля, приведенным в работах [15, 16].

Типы кривых ρ_k при дистанционных индукционных зондированиях на фиксированной частоте соответствуют типам трехслойных разрезов *H* и *K* (рис. 2, 3).

Закономерности изменения магнитного поля ВМД для трехслойной среды, выполняемые с использованием коэффициента α по точной формуле (8), не соответствуют расчетам поля с помощью рекуррентной формулы [17, 18].

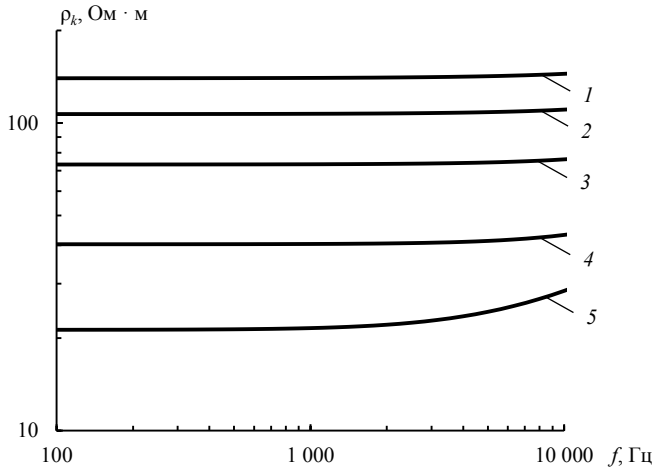


Рис. 5. Кривые ρ_k при частотном зондировании двухслойной среды: ρ_1 = 20 Ом · м; ρ_2 = 200 Ом · м; на разносе *r* = 20 м; *1* – *h* = 0,5 м; *2* – *h* = 1 м; *3* – *h* = 2 м; *4* – *h* = 5 м; *5* – *h* = 10 м

Fig. 5. Curves ρk under frequency sounding of the two-layered earth: ρ_1 = 20 Ω · m; ρ_2 = 200 Ω · m; at a span *r* = 20 m; *1* – *h* = 0.5 m; *2* – *h* = 1 m; *3* – *h* = 2 m; *4* – *h* = 5 m; *5* – *h* = 10 m

Использование частотных характеристик составляющих магнитного поля на фиксированном разносе *r* для решения задачи расчленения слоистого разреза непригодно, так как магнитное поле в ближней зоне (зоне индукции) нечувствительно к сопротивлению слоистой среды [5, 19, 20].

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые измерений составляющих магнитного поля B_z и B_r на 27 частотах в диапазоне 0,1–7 кГц на разносе 20 м над слоистой средой (по данным ВЭЗ) [21]. Величина B_r составляющей магнитного поля приведена к рабочей частоте *f*, поскольку она линейно зависит от нее.

На рис. 5 приведены теоретические кривые ρ_k, определяемые по формуле (5) при частотных индукционных зондированиях над двухслойной средой на разносе *r* = 20 м для модели среды *проводник–диэлектрик*, представленной на рис. 1.

Как видно из приведенных кривых, если величина H_z составляющей магнитного поля соответствует полю постоянного тока и практически не зависит от частоты и, соответственно, удельного сопротивления среды, то величина H_r составляющей поля над слоистой средой соответствует полю с некоторой «эффективной» величиной удельного сопротивления. При расчете величины ρ_k по формуле (5) эта зависимость от частоты сокращается. Однако представленные на рис. 5 зависимости показывают, что при проведении электромагнитного профилирования на одной частоте сохраняется зависимость величины H_r составляющей поля и ρ_k соответственно при изменении мощности верхнего слоя. Для указанной модели двухслойной среды *проводник–диэлектрик* увеличение мощности приводит

к уменьшению определяемой величины ρ_k, а при обратном соотношении удельных сопротивлений слоя и подстилающей среды величина ρ_k будет увеличиваться.

При проведении фазочувствительных измерений составляющих магнитного поля есть возможность использовать для расчета кажущегося удельного сопротивления среды не отношение составляющих поля $|H_z|/|H_r|$, а отношение полуосей эллипса поляризации магнитного поля $|H_a|/|H_b|$ по той же формуле (5). Поскольку оси эллипса поляризации магнитного поля являются физическими эквивалентами пространственных составляющих [5], получаемые типы кривых ρ_k дистанционных зондирований также соответствуют типам разрезов. При этом использование для интерпретации отношения величин полуосей эллипса поляризации предпочтительнее, так как позволяет исключить из результатов измерений погрешности, связанные с нарушением пространственной ориентировки датчиков z и r составляющих магнитного поля.

Выполненные исследования позволяют при изучении геоэлектрического строения исследуемой среды в рамках горизонтально-слоистой модели определить технологию проведения индуктивных электромагнитных исследований методами профилирования и зондирования при непрерывных и дискретных измерениях поля [20].

При проведении непрерывного индукционного профилирования с источником в виде вертикального магнитного диполя измерения составляющих гармонического магнитного поля проводят на ряде (3 и более) дискретных частот. Средняя (оптимальная) частота выбирается из предварительных измерений поля на спектре частот для заданного разноса, определяемого исходя из требуемой глубинности исследований. Оптимальной следует принять частоту, соответствующую волновому параметру среды вблизи $p = 0{,}1$, имея в виду возможное изменение удельного сопротивления среды как в большую, так и в меньшую сторону с изменением волнового параметра в зоне индукции при рабочем диапазоне $0{,}01 \le p \le 1$. Непрерывное индукционное профилирование позволяет определить участки исследуемой трассы, в пределах которых изменения магнитного поля близки к постоянным значениям (или изменяются плавно). Для исключения погрешностей измерений, обусловленных изменением ориентировки датчиков магнитного поля и момента источника, *Re* и *Im* квадратуры и пространственные компоненты комплексных составляющих магнитного поля пересчитываются в составляющие большой и малой осей эллипса поляризации, по которым определяются значения кажущегося удельного сопротивления среды ρ_k (5). В пределах исследуемых однородных участков ρ_k определение физико-геометрических параметров слоистой среды выполняют по результатам проведений дистанционных индукционных зондирований на дискретной частоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гасаненко Л. Б. Поле вертикального гармонического магнитного диполя над поверхностью многослойной структуры // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1959. № 278. С. 164–173.

2. Заборовский А. И. Переменные электромагнитные поля в электроразведке. М.: МГУ, 1960. 186 с.

3. Краев А. П. Основы геоэлектрики. Л.: Недра, 1965. 587 с.

4. Вешев А. В., Ивочкин В. Г. Электропрофилирование с определением эффективных параметров среды по амплитудным и амплитудно-фазовым измерениям // Геофизическое приборостроение. 1963. Вып. 14. С. 61–67.

5. Светов Б. С. Теория, методика и интерпретация материалов низкочастотной индуктивной электроразведки. М.: Недра, 1973. 256 с.

6. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. Л.: ЛГУ, 1978. 55 с.

7. Давыдов В. А. Двухмерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // Вопросы естествознания. 2018. № 1(15). С. 62–69.

8. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе. Л.: Недра, 1980. 391 с.

9. Гасаненко Л. Б. К вопросу о вычислении нормального поля приподнятого магнитного диполя // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1964. № 324. С. 70–78.
10. Шейнманн С. М. Об установлении электромагнитных полей в земле // Прикладная геофизика. 1947. Вып. 3. С. 3–55.
11. Ваньян Л. Л. Основы электромагнитных зондирований. М.: Недра, 1965. 109 с.
12. Anderson W. L. Computer Program Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering // Geophysics. 1979. Vol. 44. No. 7. P. 1287–1305.
13. Вешев А. В., Любцева Е. Ф. Электромагнитное зондирование с вертикальным магнитным диполем над двух- и трехслойными средами // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1974. Вып. 24. С. 3–35.
14. Кузнецов А. Н., Морозова Г. М., Пятницкий В. И. и др. Дипольные частотные зондирования двухслойной среды: методические рекомендации. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1980. Ч. 1. 124 с.
15. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Возможности электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем при изучении разрезов типа К // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1975. № 396. С. 23–34.
16. Вешев А. В., Любцева Е. Ф., Леончиков В. М. Возможности электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем при изучении разрезов типа Н // Ученые записки ЛГУ. Вопросы геофизики. 1977. № 391. С. 35–48.
17. Журавлева Р. Б., Колесняк С. А. Пакет «EMPACK» для решения прямых и обратных задач электроразведки с использованием стационарных и гармонических полей // Геоэлектрические исследования контрастных по электропроводности сред. Екатеринбург: Наука, Уральское отд. 1996. С. 46–55.
18. Кауфман А. А. Введение в теорию геофизических методов. Ч. 2. Электромагнитные поля. М.: Недра, 2000. 483 с.
19. Вешев А. В., Ивочкин В. Г., Игнатьев Г. Ф. Электромагнитное профилирование. Л.: Недра, 1971. 216 с.
20. Молочнов Г. В., Радионов М. В. Частотные электромагнитные зондирования с вертикальным магнитным диполем. Л.: ЛГУ, 1982. 216 с.
21. Арзамасцев Е. В., Исламгалиев Д. В., Коноплин А. Д., Ратушняк А. Н. Электромагнитная система для непрерывного индуктивного профилирования // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 91–97.

Поступила в редакцию 12 февраля 2020 года

Сведения об авторах:

Арзамасцев Евгений Владимирович – младший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: brigan88@yandex.ru
Астафьев Павел Федорович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: pashaek@mail.ru
Байдиков Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: badikek@mail.ru
Коноплин Алексей Дмитриевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института геофизики УрО РАН. E-mail: pbs002@mail.ru
Ратушняк Александр Николаевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Института геофизики УрО РАН. E-mail: geo_info@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31

Inductive sounding of layered earth

Evgenii V. Arzamastsev[1], Pavel F. Astafiev[1], Sergei V. Baidikov[1], Aleksei D. Konoplin[1], Aleksandr N. Ratushniak[1]
[1] Institute of Geophysics UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract
Research aim. *The research results in the development of a technology of continuous multi-frequency induction profiling measuring magnetic field components on long survey routes and detailed elaboration of sections by means of remote induction soundings.*
Research methodology. *Theoretical and experimental studies of magnetic field components change patterns of harmonic vertical magnetic dipole over non-uniform layered earth. Mathematical simulation of harmonic vertical magnetic dipole magnetic field in non-uniform layered earth.*
Analysis of results. *Information value of harmonic vertical magnetic dipole magnetic field components characteristics in low-frequency induction zone has been shown when studying non-uniform geoelectric sections together with the obtained results correspondence to the type of the non-uniform section when carrying out remote inductive sounding.*

Scope of results. *for extended sections of route research (road and railway, oil and gas pipelines, power transmission lines, etc.) process sequence of vertical magnetic dipole magnetic field characteristics measurement has been determined to determine geoelectric properties of a layered section by means of continuous multi-frequency profiling and determination of homogeneous sections of medium structure with their detailing by discrete analysis by the method of remote inductive sounding.*

Key words: *harmonic electromagnetic field; inductive sounding; vertical magnetic dipole; apparent electrical resistance.*

REFERENCES

1. Gasanenko L. B. The field of vertical harmonic magnetic dipole over the surface of multilayered structure. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1959; 278: 164–173. (In Russ.)

2. Zaborovskii A. I. *Non-uniform electromagnetic fields in electrical prospecting*. Moscow: MSU Publishing; 1960. (In Russ.)

3. Kraev A. P. *The fundamentals of geoelectrics*. Leningrad: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)

4. Veshev A. V., Ivochkin V. G. Electrical profiling with the determination of effective parameters of a medium by the amplitude and amplitude-phase measurements. *Geofizicheskoe priborostroenie = Geophysical Instruments Design*. 1963; 14: 61–67. (In Russ.)

5. Svetov B. S. *Theory, methods and interpretation of low-frequency inductive sounding materials*. Moscow: Nedra Publishing; 1973. (In Russ.)

6. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. *Interim guidance for the method of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole*. Leningrad: LSU Publishing; 1978. (In Russ.)

7. Davydov V. A. Two-dimensional inversion of remote induction sounding. *Voprosy estestvoznaniia = Issue of Natural Science*. 2018; 1(15): 62–69. (In Russ.)

8. Veshev A. V. *Electrical profiling at direct and alternating current*. Leningrad: Nedra Publishing; 1980. (In Russ.)

9. Gasanenko L. B. On the problem of calculating the normal field of the elevated magnetic dipole. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1964; 324: 70–78. (In Russ.)

10. Sheinmann S. M. On the issue of setting electromagnetic fields below ground. *Prikladnaia geofizika = Applied Geophysics*. 1947; 3: 3–55. (In Russ.)

11. Vanian L. L. *The fundamentals of electromagnetic sounding*. Moscow: Nedra Publishing; 1965. (In Russ.)

12. Anderson W. L. Computer Program Numerical integration of related Hankel transforms of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*. 1979; 44 (7): 1287–1305.

13. Veshev A. V., Liubtseva E. F. Electromagnetic sounding with magnetic dipole over the two- or three-layered earth. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1974; 24: 3–35. (In Russ.)

14. Kuznetsov A. N., Morozova G. M., Piatnitskii V. I., et al. *Dipole frequency sounding of the two-layered earth: methodological recommendations*. Novosibirsk: Institute of Geology and Geophysics SB AS USSR Publishing; 1980. Pt. 1. (In Russ.)

15. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. Opportunities of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole when studying the K-type sections. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1975; 396: 23–34. (In Russ.)

16. Veshev A. V., Liubtseva E. F., Leonchikov V. M. Opportunities of electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole when studying the N-type sections. *Uchenye zapiski LGU. Voprosy geofiziki = Proceedings of LSU. Geophysical Issues*. 1977; 391: 35–48. (In Russ.)

17. Zhuravleva R. B., Kolesniak S. A. EMPACK software for direct and inverse problems of electrical prospecting with the use of static and harmonic fields. In: *Geoelectric survey of electrically contrast media*. Ekaterinburg: Nauka (Ural branch) Publishing; 1996. p. 46–55. (In Russ.)

18. Kaufman A. A. *An introduction to the theory of geophysical methods. Pt. 2. Electromagnetic fields*. Moscow: Nedra Publishing; 2000. (In Russ.)

19. Veshev A. V., Ivochkin V. G., Ignatiev G. F. *Electromagnetic profiling*. Leningrad: Nedra Publishing; 1971. (In Russ.)

20. Molochnov G. V., Radionov M. V. *Frequency electromagnetic sounding with vertical magnetic dipole*. Leningrad: LSU Publishing; 1982. (In Russ.)

21. Arzamastsev E. V., Islamgaliev D. V., Konoplin A. D., Ratushniak A. N. Electromagnetic system for continuous inductive profiling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 6: 91–97. (In Russ.)

Received 12 February 2020

Information about authors:

Evgenii V. Arzamastsev – senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: brigan88@yandex.ru
Pavel F. Astafiev – PhD (Geology and Mineralogy), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: pashaek@mail.ru

Sergei V. Baidikov – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: badikek@mail.ru
Aleksei D. Konoplin – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: pbs002@mail.ru
Aleksandr N. Ratushniak – PhD (Engineering), Head of the laboratory, Institute of Geophysics UB RAS. E-mail: geo_info@mail.ru

Для цитирования: Арзамасцев Е. В., Астафьев П. Ф., Байдиков С. В., Коноплин А. Д., Ратушняк А. Н. Индукционные зондирования слоистых структур // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 21–31. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31
For citation: Arzamastsev E. V., Astafiev P. F., Baidikov S. V., Konoplin A. D., Ratushniak A. N. Inductive sounding of layered earth. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 21–31 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-21-31

УДК 550.8.05 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39

Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника

Мельник В. В.[1], Харисов Т. Ф.[1, 2]*, Замятин А. Л.[1], Харисова О. Д.[1]
[1] Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия
[2] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: timur-ne@mail.ru

Реферат

Введение. *В настоящее время геофизические методы исследования массива горных пород нашли широкое применение в горном деле и в науках о Земле. С их помощью выполняются поисково-оценочные работы в массиве, а именно выявление структурных неоднородностей, пустот, а также различных зон контактов сред с достаточно высокой точностью. Точность полученных результатов зависит от метода, который используется в тех или иных условиях, характера и параметров искомого объекта, внешних условий проведения натурного эксперимента, а также поставленных в работе задач.*

Методы исследований. *Выполнен комплекс геофизических исследований с использованием методов спектрального сейсмопрофилирования и георадарного зондирования в условиях подземного рудника. Измерения проводились для поиска различных объектов под разным углом к искомому объекту с целью определения расстояния до него.*

Результаты исследований. *В результате исследований комплексом геофизических методов обнаружен металлический полок под насыпной горной массой с последующим выделением границ двух ярусов полка при проведении вертикально направленных измерений. В процессе поиска нижележащей выработки в массиве при проведении вертикально направленных геофизических измерений в горизонтальной выработке в 20 м от ствола выявлено изменение плотности спектра на глубине около 55 м, что совпадает с фактическим расположением искомой выработки. Результаты поиска пустот в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту показали отсутствие достаточно явных границ и невозможность оценки расстояния до пустот в заложенных камерах.*

Ключевые слова: *георадар; геофизические исследования в подземных условиях; ствол шахты; массив; пустоты; спектральное сейсмопрофилирование.*

Введение. Исследование массива горных пород с помощью геофизических методов является одним из наиболее эффективных способов решения поисково-оценочных задач в горном деле, газовой, нефтяной промышленности, а также в науках о Земле. Современное геофизическое оборудование позволяет дистанционно вести исследования природно-техногенных объектов в верхней части земной коры, выявлять структурные и петрографические неоднородности, тектонические разломы, карсты, пустоты, образованные при не до конца заложенных камерах или усадке закладочного материала, а также зоны контактов различных сред в массиве горных пород [1–10]. Точность полученных результатов зависит от множества факторов, а именно от того, какой метод используется в тех или иных условиях, от характера и параметров искомого объекта, от внешних условий проведения эксперимента, а также поставленных в работе задач.

Специалистами Института горного дела УрО РАН геофизические методы применяются, в том числе, для решения нестандартных задач на подземных рудниках и карьерах. Одной из таких задач в 2015 г. было определение мощности пробки из грунта и обломков крепи в стволе «Шахты им. С. М. Кирова», для оценки возможности ее устранения и разработки необходимых мероприятий по ликвидации аварийного ствола [11–14].

В статье представлены исследования и сравнительный анализ геофизических методов георадарного зондирования и спектрального сейсмопрофилирования (ССП) в условиях подземного рудника с определением допустимых задач, для решения которых данные методы использованы. Измерения проводились для поиска различных объектов и под разным углом к искомому объекту, а именно:

– поиск металлической конструкции под насыпной горной массой при проведении вертикально направленных измерений с определением приблизительного расстояния до искомого объекта (рис. 1, *а*);

– поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении вертикально направленных измерений с определением приблизительного расстояния до искомого объекта (рис. 1, *а*);

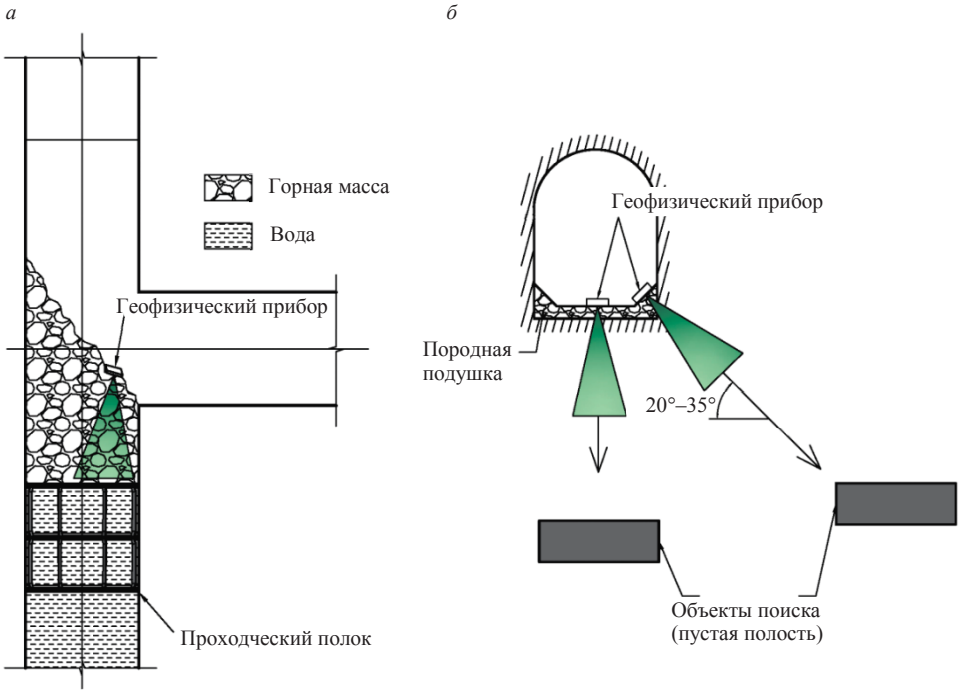


Рис. 1. Схема проведения геофизических исследований
Fig. 1. Geophysical research design

– поиск пустоты (полости, выработанного пространства) в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту (рис. 2) с определением приблизительного расстояния до искомого объекта.

Выбор набора геофизических методов в составе георадарного зондирования и ССП обусловлен низкой трудоемкостью, высокой скоростью и технологической простотой проведения измерений, что позволяет эффективно использовать их в подземных условиях во вмещающем скальном массиве горных пород.

Методы и их описание. Метод спектрального сейсмопрофилирования основан на использовании зависимости между спектральным составом колебательного процесса, возникающего при ударном воздействии на обнаженную поверхность горного массива, и структурным строением этого массива. Границы, выявляемые данным методом, представляют собой поверхности, по которым возможно взаимное проскальзывание соседних сред, т. е. трещины и контакты горных пород. Основными объектами, выявляемыми методом спектрального сейс-

мопрофилирования, являются как открытые, так и сомкнутые трещины и их совокупности в виде локальных зон трещиноватости [13–15].

Метод георадарного зондирования основан на излучении сверхширокополосных наносекундных импульсов, приеме сигналов, отраженных от границ раздела пород или иных отражающих объектов, обработке принятых сигналов и последующим измерением временных интервалов между отраженными импульсами [16].

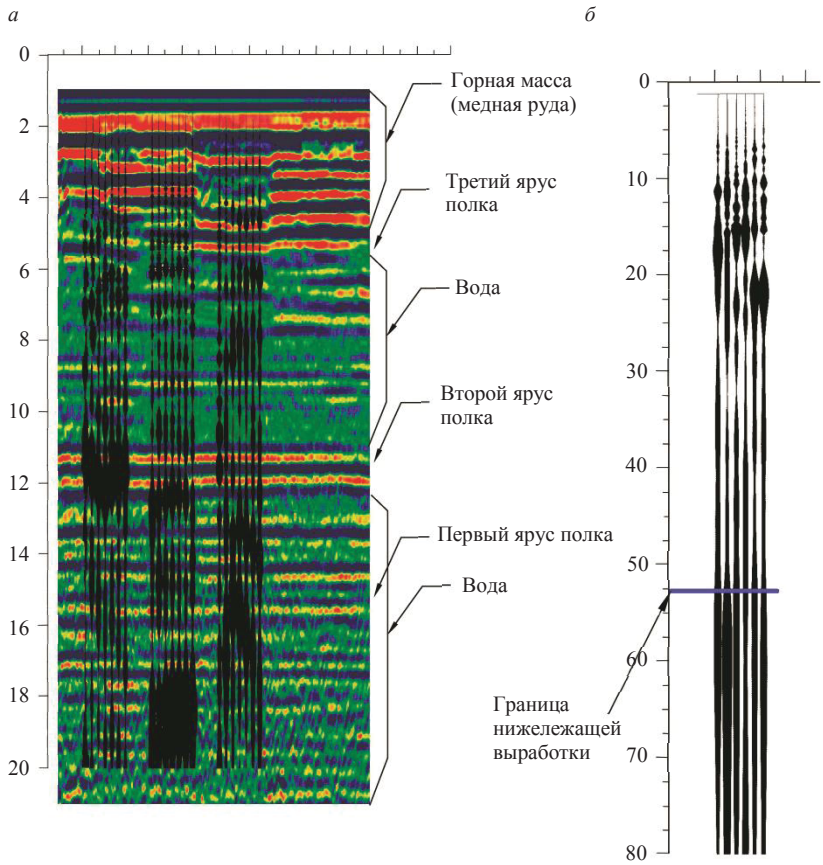


Рис. 2. Результаты геофизических исследований:
а – поиск металлического полка; *б* – поиск нижележащей выработки
Fig. 2. Geophysical research results:
а – metallic shelf search; *б* – underlying excavation search

Основная задача, решаемая с использованием данного метода, состояла в определении положения границ раздела в изучаемых средах. Модель среды представляется в виде слоистой толщи с постоянными электрофизическими свойствами внутри каждого слоя и локальных объектов, отличающихся по электрофизическим свойствам от вмещающего материала. Наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами. Затухание определяет глубинность зондирования, скорость – расстояние до отражающей границы [16–17].

В работе использовался георадар ОКО-2 с экранированными антенными блоками. Он позволяет исследовать горный массив на глубину до 30 м с ранжированием породного блока по изменению электромагнитных свойств.

Результаты исследований. Поиск металлической конструкции под насыпной горной массой подразумевает поиск упавшего и застрявшего в эксплуатируемом стволе проходческого металлического трехъярусного полка. Причиной падения полка является скопившаяся на нем за несколько лет, в процессе транспортирования руды в скиповом стволе, горная масса в виде россыпи, а также непредвиденная разгрузка скипа. Нижняя часть ствола на момент падения была частично затоплена, в результате чего падение полка на скопившуюся в стволе воду привело к его деформированию от удара и расклиниванию между стенок. Особенность данной ситуации в том, что объем скопившейся горной массы на полке был неизвестен и отметка, на которой он находился (застрял) после падения, не определена. Визуальное обследование пробки с ближайшего горизонта не дало положительных результатов, так как с почвы горизонтальной выработки была видна только верхняя часть горной массы, а проследить ее мощность не представлялось возможным. Каких-либо частей полка, торчащих из горной массы, также не наблюдалось. Комплекс геофизических измерений с использованием двух названных ранее методов был выполнен по схеме, представленной на рис. 1, *а*.

На рис. 2, *а* показаны результаты поиска металлической конструкции под насыпной горной массой при проведении вертикально направленных измерений, где отображена совокупность слоев на различных отметках. На глубине около 5,5 м проявляется четкая граница нескольких сред с различной диэлектрической проницаемостью. Верхняя часть слоев до глубины 5,5 м соответствует раздробленной горной массе, состоящей преимущественно из медной руды, которая находится на третьем (верхнем) ярусе металлического полка. Нижняя часть слоев до глубины 11 м имеет иные характеристики и является водной средой, которая заполняет пространство между ярусами полка. Граница на глубине около 11 м является вторым ярусом полка (средним). Нижняя часть профиля зондирования представлена отражениями сигнала от металлических конструкций полка и скопившейся горной массы, а их интерпретация затруднительна. Результаты метода спектрального сейсмопрофилирования отображены на рис. 2, *а* в виде трех профилей, соответствующих трем измерениям на разных участках пробки, которые характеризуются изменением плотности спектра на различных границах, выявленных в рамках проходящего через них сигнала.

Границы, на которых происходит увеличение плотности спектра: 5,5–6,0 м, 10,5–11,0 м, около 15 м. При этом на каждом из профилей границы несколько отличаются, что скорее всего вызвано деформацией металлического полка и невысокой надежностью данного метода.

Следующие измерения выполнены для поиска пустоты, а именно нижележащей выработки в массиве горных пород, при проведении вертикально направленных геофизических измерений. Измерения проводились из горизонтальной выработки в 20 м от ствола, схема отражена на рис. 1, *б*. Исходя из результатов выявлено, что изменение плотности спектра прослеживается на глубине около 55 м, что совпадает с фактической отметкой расположения искомой выработки нижележащего горизонта (рис. 2, *б*). Георадар ОКО-2 в данном эксперименте не использовался, так как дальность его действия ограничена 30 м.

Поиск пустот в массиве горных пород при проведении измерений под углом к искомому объекту и определение расстояния до него являются наиболее сложной частью данной работы. Геофизические измерения выполнялись из горизонтальной выработки с целью поиска пустот в камерах, образование которых обусловлено усадкой закладочного материала при его затвердевании. Ширина камеры составляет около 20 м, а длина – 80 м. Расстояние от выработки, из которой проводились измерения, до пустоты в камерах предварительно оценивалось разве-

дочным бурением скважин № 1–4, оно составляет около 15–27 м в зависимости от угла наклона скважины (рис. 3). Подробная схема измерений представлена на рис. 1, *б* и 3.

На основании анализа результатов, полученных двумя рассматриваемыми геофизическими методами, выявлено отсутствие явных границ *массив–пустота*. Георадар обнаружил разность пород, отобразив участок с нарушенными сланцами, однако на расстоянии более 13 м сигнал затухает, и обнаружение пустот и структурных неоднородностей, находящихся глубже, не представляется возможным. Метод спектрального сейсмопрофилирования также не позволяет оценить наличие пустоты в массиве. На всем профиле измерений плотность спектра изменяется в хаотичном порядке, что делает интерпретацию результатов проблематичной.

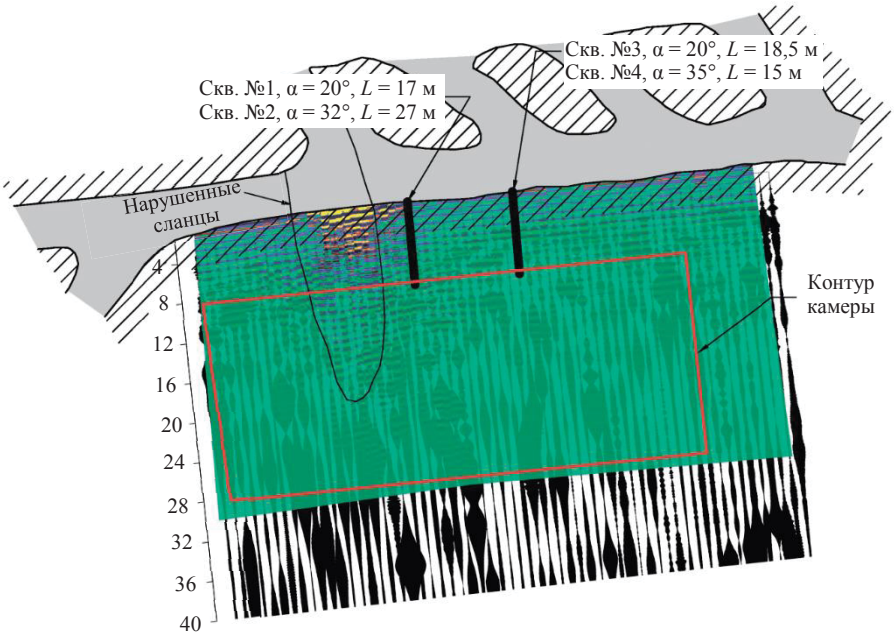


Рис. 3. Результаты геофизических исследований при поиске пустот в камерах
Fig. 3. Results of geophysical research when searching for voids in stopes

Выводы. Метод георадарного зондирования является наиболее эффективным в подземных условиях при наличии скального массива пород. Он позволяет выявлять неоднородности, структурные нарушения и другие контрастные объекты в массиве горных пород при вертикально направленных измерениях. Измерения под углом к искомому объекту значительно осложняют выполнение поисково-оценочных задач, так как невозможно достаточно точно сориентировать прибор под необходимым углом.

Метод спектрального сейсмопрофилирования наиболее эффективен при выполнении вертикально направленных измерений, но имеющаяся погрешность требует большего количества измерений на исследуемом участке. Данный метод хорошо себя зарекомендовал как дополнительный (косвенный) с целью подтверждения или проверки результатов основного метода.

Достижение максимальной достоверности и информативности результатов геофизических исследований обеспечивается комплексированием методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // ГИАБ. 2019. № 5. С. 124–132.
2. Гапонов Д. А., Фоменко Л. Н., Шеремет Р. Д. Применение георадара для контроля качества закрепления грунтов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 3(42). С. 68–71.
3. Серегин М. Ю. Перспективы развития георадиолокации // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 5(11). С. 70–72.
4. Носкевич В. В., Федорова Н. В. Использование метода георадиолокации для исследований древнего медного рудника «Воровская яма» на Южном Урале // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 4(52). С. 61–67.
5. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Известия вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
6. Fischanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M. 4D crossborehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy) // Near Surface Geophysics. 2013. Vol. 11. P. 41–50.
7. Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F., Gualerzi D. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils // Engineering Geology. 2011. Vol. 119. P. 18–30.
8. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt // Archaeological Discovery. 2014. Vol. 2. No. 2. P. 31–43.
9. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology // Analytical Methods in Earth and Environmental Science. N. Y.: Wiley, 2016. 160 p.
10. Dafflon B., Leger E., Soom F., Ulrich C., Peterson J. E., Hubbard S. S. Quantification of arctic soil and permafrost properties using Ground Penetrating Radar // Proc. of 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in the Hong Kong, 2016.
11. Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Ведерников А. С. Особенности ликвидации ствола шахты им. С. М. Кирова Турьинского медного рудника // Проблемы недропользования. 2015. № 2(5). С. 19–24.
12. Далатказин Т. Ш., Харисов Т. Ф. Исследование последствий затопления подземного рудника на селитебной территории // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2019. № 2. С. 38–51.
13. Мельник В. В., Замятин А. Л. Исследование структурных особенностей массива горных пород подземных сооружений // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 165–171.
14. Мельник В. В. Применение метода спектрального сейсмопрофилирования для оценки геомеханического состояния массива горных пород вокруг шахтных выработок // ГИАБ. 2005. № 10. С. 69–74.
15. Гликман А. Г. Применение спектрально-сейсморазведочного профилирования (ССП) для поисков месторождений полезных ископаемых // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2001. № 3. С. 31–35.
16. Набатов В. В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счет уменьшения помехового влияния прямой волны // ГИАБ. 2014. № S1. С. 43–55.
17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. An advanced GPR modelling framework: the next generation of gprMax // IEEE, 2015. An advanced GPR modelling framework. P. 1–4.

Поступила в редакцию 13 февраля 2020 года

Сведения об авторах:

Мельник Виталий Вячеславович – кандидат технических наук, заведующий отделом геомеханики Института горного дела УрО РАН. E-mail: melnikvv74@mail.ru
Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН, доцент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: timur-ne@mail.ru
Замятин Алексей Леонидович – научный сотрудник лаборатории технологии снижения риска катастроф при недропользовании Института горного дела УрО РАН. E-mail: melnikvv74@mail.ru
Харисова Ольга Дмитриевна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород. Института горного дела УрО РАН. E-mail: olgazheltysheva@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39

Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine

Vitalii V. Melnik[1], Timur F. Kharisov[1, 2], Aleksei L. Zamiatin[1], Olga D. Kharisova[1]
[1] Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.
[2] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *At present, geophysical methods of rock mass research have found wide application in mining and Earth sciences. They are used to perform prospecting and evaluation work in the massif, namely, to identify structural irregularities, voids and various contact zones of the media with sufficient accuracy. The accuracy of the results obtained depends on the method used in particular conditions, the nature and parameters of the target, the external conditions of the natural experiment, as well as the tasks set in the work.*

Research methodology. *The work included a set of geophysical studies, namely, methods of spectral seismic profiling and GPR in an underground mine. Measurements were made to find different objects at different angles to the object in question in order to determine the distance to it.*

Research results. *As a result of investigating with a complex of geophysical methods, a metal shelf was found under the bulk rock mass and two shelf tiers were subsequently separated when carrying out vertically directed measurements. In the process of searching for the underlying excavation in the massif during vertically directed geophysical measurements, which were carried out in the horizontal excavation 20 meters from the shaft, changes in spectrum density at a depth of about 55 m were detected, which coincides with the actual location of the sought excavation. The results of cavity search in rock mass when making measurements at an angle to the object sought showed that there are no sufficiently clear boundaries and it is impossible to estimate the distance to the cavity in the filled stopes.*

Key words: *GPR; underground geophysical research; mine shaft; massif; voids; spectral seismic profiling.*

REFERENCES

1. Andrianov S. V. GPR monitoring of space between lining and rock in underground mines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 5: 124–132. (In Russ.)

2. Gaponov D. A., Fomenko L. N., Sheremet R. D. The use of georadar in quality control of soil stabilization. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*. 2016; 3(42): 68–71. (In Russ.)

3. Seregin M. Iu. Future Development of Ground-Penetrating Radars. *Nauka i biznes: puti razvitiia = Science and Business. Development ways*. 2012; 5(11): 70–72. (In Russ.)

4. Noskevich V. V., Fedorova N. V. Using the ground penetrating radar method for research of the ancient "Vorovskaya Yama" copper mine in the South Ural. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta = News of the Ural State Mining University*. 2018; 4(52): 61–67. (In Russ.)

5. Kalashnik A. I., Diakov A. Iu. Georadar research of geological-structural configuration of open pit working bench. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2015; 6: 73–78. (In Russ.)

6. Fischanger F., Morelli G., Ranieri G., Santarato G., Occhi M. 4D crossborehole electrical resistivity tomography to control resin injection for ground stabilization: a case history in Venice (Italy). *Near Surface Geophysics*. 2013; 11: 41–50.

7. Santarato G., Ranieri G., Occhi M., Morelli G., Fischanger F., Gualerzi D. Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils. *Engineering Geology*. 2011; 119: 18–30.

8. Elsayed I. S., Alhussein A. B., Gad E., Mahfooz A. H. Shallow Seismic Refraction, Two-Dimensional Electrical Resistivity Imaging, and Ground Penetrating Radar for Imaging the Ancient Monuments at the Western Shore of Old Luxor City, Egypt. *Archaeological Discovery*. 2014; 2 (2): 31–43.

9. Conyers L. B. Ground-penetrating Radar for Geoarchaeology. *Analytical Methods in Earth and Environmental Science*. N. Y.: Wiley; 2016. 160 p.

10. Dafflon B., Leger E., Soom F., Ulrich C., Peterson J. E., Hubbard S. S. Quantification of arctic soil and permafrost properties using Ground Penetrating Radar. *Proc. of 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in the Hong Kong, 2016*.

11. Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Vedernikov A. S. Features of elimination the shaft of the "S. M. Kirov" mine in Turyinsky copper mine. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2015; 2(5): 19–24. (In Russ.)

12. Dalatkazin T. Sh., Kharisov T. F. Investigations of the concequences of Turyinsky copper mine flooding. *Izvestiia Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2019; 2: 38–51. (In Russ.)

13. Melnik V. V., Zamiatin A. L. Investigation of structural peculiarities of rock massif in surrounding of underground structures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2008; 8: 165–171. (In Russ.)

14. Melnik V. V. Spectral seismic profiling application to assess the geomechanical state of the rock mass around shaft goafs. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2005; 10: 69–74. (In Russ.)

15. Glikman A. G. Applying spectral seismic profiling (SSP) for mineral exploration. *Geologiia, geofizika i razrabotka neftianykh i gazovykh mestorozhdenii = Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*. 2001; 3: 31–35. (In Russ.)

16. Nabatov V. V. Improving the efficiency of GPR survey of metro tunnel structures by means of reducing the interference of a direct signal. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; S1: 43–55. (In Russ.)

17. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. An advanced GPR modelling framework: the next generation of gprMax. *IEEE, 2015. An advanced GPR modelling framework*. P. 1–4.

Received 13 February 2020

Information about authors:

Vitalii V. Melnik – PhD (Engineering), Head of Geomechanical Department, Institute of Mining UB RAS. E-mail: melnikvv74@mail.ru
Timur F. Kharisov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Structures Geomechanics, Institute of Mining UB RAS, associate professor, Department of Mine Construction, Ural State Mining University. E-mail: timur-ne@mail.ru
Aleksei L. Zamiatin – researcher, Laboratory of Disaster Risk Reduction Technology at Subsoil Use, Institute of Mining UB RAS. E-mail: melnikvv74@mail.ru
Olga D. Kharisova – researcher, Laboratory of Rock Displacement, Institute of Mining UB RAS. E-mail: olgazheltysheva@gmail.com

Для цитирования: Мельник В. В., Харисов Т. Ф., Замятин А. Л., Харисова О. Д. Оценка эффективности комплекса геофизических методов исследований массива в условиях подземного рудника // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 32–39. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39
For citation: Melnik V. V., Kharisov T. F., Zamiatin A. L., Kharisova O. D. Assessing the efficiency of a complex of geophysical methods of rock mass research under the conditions of an underground mine. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 32–39 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-32-39

УДК 622.02:531+622.83 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций

Волков М. Н.[1]*, Половов Б. Д.[1], Прищепа Д. В.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru

Реферат

Введение. *Результаты, полученные в отечественной и зарубежной практике, не гарантируют высокое качество оценивания состояния вмещающих массивов горных пород и достоверность обоснования рациональных геомеханических решений, что подтверждается фактическими уровнями травматизма и аварийности, в том числе форс-мажорами катастрофического характера. Таким образом, практикуемые методы геомеханического анализа нуждаются в кардинальном совершенствовании.*

Цель работы *– разработка компьютерных технологий комплексного детерминированно-вероятностного моделирования в рамках системы оценивания и обеспечения качества геомеханических решений – совокупности взаимосвязанных оценок и показателей, таких как оперативность, доступность, достоверность, надежность и достаточность информации о свойствах и состоянии вмещающих массивов горных пород; соответствие требованиям нормативных документов; уровни геомеханических рисков по факторам аварийности, травматизма и экологической опасности; потенциальные ущербы от последствий рисков, финансовые поступления и затраты, включающие функции влияния потенциальных ущербов и результативность мониторинга.*

Методология. *Исследования проведены на основе имитационного конструктора – базовой программы, предназначенной для конструирования, отладки и испытания новых комплексных детерминированно-вероятностных моделей геомеханических ситуаций, выполняющих исследовательскую, обучающую, демонстрационную функции, резервирование процесса и результатов моделирования, купирование погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. Главная особенность конструктора – наличие взаимосвязанных составляющих: детерминированной и имитационной. Такой комплекс дает исследователю важную взаимодополняющую информацию: детерминированный метод выполняет страхующие функции и определяет непротиворечие результатов анализа требованиям нормативной документации; вероятностный – обеспечивает объективную количественную оценку геомеханических рисков или надежностей с выходом на получение однозначной результативности по факторам экономической и социальной безопасности, исключает или существенно снижает вероятность внесения излишних затрат. Универсальность подхода к созданию компьютерных технологий моделирования геомеханических решений, реализующих детерминированно-имитационный комплекс на основе методов непараметрической статистики, подтверждается примерами моделирования в многовариантной постановке.*

Область применения *– горнотехнические сооружения строительной, подземной, открытой, комбинированных технологий горнодобывающих предприятий и специфических объектов освоения подземного пространства в различных отраслях народного хозяйства.*

Выводы. *Компьютерные технологии моделирования геомеханических ситуаций на основе комплекса детерминированных, имитационных методов и процедур непараметрической статистики малых выборок вносят решающий вклад в систему оценивания и обеспечения качества геомеханических решений. Отмечается универсальность формирования компьютерных технологий, доступность широкому кругу пользователей, простота и оперативность реализации.*

Ключевые слова: *компьютерные технологии; детерминированно-имитационное моделирование; непараметрическая статистика; качество; геомеханичекие решения; имитационный конструктор; генерация; случайные числа; риск; критерии.*

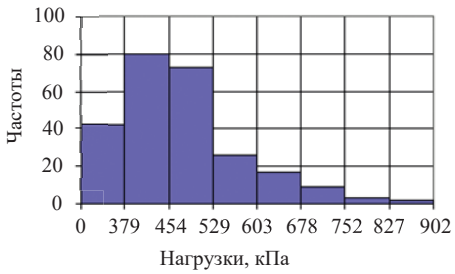
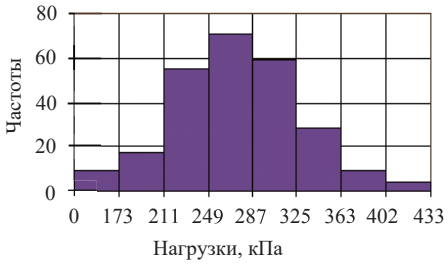
Введение. Основу современного геомеханического анализа составляют мощная нормативная база, фонд аналитических разработок и бурно развивающиеся компьютерные технологии, обеспечившие несомненные достижения и прогресс в области геомеханики. Вместе с тем результаты, полученные в отечественной и зарубежной практике, не гарантируют высокое качество оценивания состояния вмещающих массивов горных пород и достоверность обоснования рациональных геомеханических решений, что подтверждается фактическими уровнями травматизма и аварийности, в том числе форс-мажорами катастрофического характера [1–4]. Главной причиной сложившейся ситуации является массовая реализация детерминированных геомеханических моделей, в которых нестабильность и изменчивость природных и технических условий учитывается страхующими коэффициентами или системами подобных показателей, в частности коэффициентами запаса, кратность которых может составлять до 10 и более единиц. Вероятностные методы геомеханического анализа имеют ограниченную область применения и не нашли должного отражения в действующих нормативных документах. Между тем экономические показатели предприятий и организаций из-за геомеханических рисков не всегда являются оптимальными, не исключается избыточность затрат, замедляются сроки выполнения работ, наблюдается их неритмичность и удорожание, снижаются доходы и запланированная прибыль. Таким образом, практикуемые методы геомеханического анализа, обеспечивающие высокое качество геомеханических решений, нуждаются в кардинальном совершенствовании.

Значительный объем исследований по этой теме был выполнен в Уральском государственном горном университете за последние 20 лет [2–4] по направлениям: «информация о свойствах и особенностях вмещающих массивов», «непараметрическая статистика», «имитационная геомеханика», представляющим прагматическую основу для разработки упорядоченной универсальной системы обеспечения качества геомеханических решений – совокупности взаимосвязанных оценок и показателей, таких как оперативность, доступность, достоверность, надежность и достаточность информации о свойствах и состоянии вмещающих массивов горных пород; соответствие требованиям нормативных документов; уровни геомеханических рисков по факторам аварийности, травматизма и экологической опасности; потенциальные ущербы от последствий рисков, финансовые поступления и затраты, включающие функции влияния потенциальных ущербов и результативность мониторинга.

Цель работы – разработка компьютерных технологий комплексного детерминированно-вероятностного моделирования, отражающая совокупность перечисленных направлений обеспечения высокого качества геомеханических решений, реализуется в два этапа: *первый* – создание имитационного конструктора комплексных детерминированно-вероятностных моделей; *второй* – исследование продуктивности новых компьютерных технологий.

Методология исследований. Имитационный конструктор представляет собой базовую программу, предназначенную для конструирования, отладки и испытания новых комплексных моделей. Наряду с этим в конструкторе предусмотрено выполнение следующих функций: исследовательской, демонстрационной, обучающей, резервирования процесса и результатов моделирования, купирования погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. В качестве базовой выбрана программа расчета нагрузок на подпорную стену, характеризуе-

Таблица 1. Результаты комплексного моделирования по базовой версии
Table 1. Integrated modeling results according to a basic version

Исходные данные	
Постоянные	
Высота подпорной стены с заделкой 10 м. Глубина заделки 3 м	
Статистики	
Коэффициент надежности по нагрузке, одностороннее нормальное распределение: M(1) = 1; S(1) = 0,067. Удельный вес грунта, кН/м^3, M(2) = 22,38, бутстреп-выборка: 23,4; 21,0; 20,8; 20,9; 21,4; 20,0; 19,7; 24,5; 32,4; 21,5; 25,0; 18,0. Угол внутреннего трения, рад, распределение Грамма–Шарлье: M(3) = 0,4373; S(3) = 0,0709; ASI(3) = –0,605; EKS(3) = –1,451	
Активная нагрузка, кПа	Пассивная нагрузка, кПа
Результаты расчета по постоянным и средним значениям M(1), M(2), M(3)	
453,1854	248,6705
Гистограммы плотности распределения нагрузок	
	

Шкалы надежностей-рисков

Нагрузка	Частота	Надежность	Риск	Нагрузка	Частота	Надежность	Риск
364,3	22	0,0873	0,9127	166,1	7	0,0278	0,9732
424,0	87	0,3452	0,6548	195,6	15	0,0595	0,9405
483,7	154	0,6111	0,3889	226,1	41	0,1627	0,8373
543.4	203	0,8056	0,1944	256,5	100	0,3968	0,6038
603,1	221	0,8770	0,1230	287,0	152	0,6032	0,3968
662,7	235	0,9325	0,0675	317,5	205	0,8135	0,1865
722,4	243	0,9643	0,0357	347,9	231	0,9167	0,0833
782,1	248	0,9841	0,0159	378,4	242	0,9603	0,0397
841,8	250	0,9921	0,0079	408,9	249	0,9881	0,0119
901,5	252	1,0000	0,0000	439,3	252	1,0000	0,0000

Проектные нагрузки DOP1, DOP2, DOP3 и риски R1, R2, R3	
DOP1 = 500, DOP2 = 600, DOP3 = 700	DOP1 = 300, DOP2 = 350, DOP3 = 400
R1 = 0,325, R2 = 0,123, R3 = 0,0397	R1 = 0,278, R2 = 0,075, R3 = 0,0159
Значимость случайных параметров DLT1, DLT2, DLT3	
DLT = 0,320, DLT2 = 0,308, DLT3 = 0,372	DLT = 0,399, DLT2 = 0,384, DLT3 = 0,216
Нагрузки по доверительным вероятностям 0,85 и 0,95	
$EA_{0,85}$ = 570,4; $EA_{0,95}$ = 685,2	$EP_{0,85}$ = 325,5; $EP_{0,95}$ = 366,5

Обозначения в таблице соответствуют обозначениям в имитационном конструкторе.

мая широкой областью использования, включающей горное дело, гидротехнику, гражданское, транспортное, энергетическое строительство и сооружения, размещаемые в подземном пространстве. Учтена простота алгоритмов расчета, наличие двух выходных случайных массивов активных и пассивных нагрузок.

Структура имитационного конструктора – 33 блока, 7 из которых изменяемых полностью или частично (объявление размерности массивов переменных, ввод исходной информации, детерминированная и имитационная модели, начало цикла обработки выходных случайных массивов, отбраковка по физическим условиям, форматы списка генераций в матричной форме) при создании новой модели и 26 блоков с неизменяемым содержанием (объявления 17 подпрограмм, открытия текстового файла, управления работой имитационного конструктора, ввода размерности бутстреп-генератора и ее синхронизации с количеством генераций других случайных параметров моделирования, генерации входных и выходных массивов, оценки степени влияния (чувствительности, значимости) случайных параметров, выведения результатов детерминированно-имитационного моделирования на экран и в текстовый файл, в частности *шкалы рисков–надежностей*).

Главная особенность конструктора – наличие взаимосвязанных составляющих: детерминированной и имитационной. Такой комплекс дает пользователю важную взаимодополняющую информацию: детерминированный метод выполняет страхующие функции и определяет непротиворечие результатов анализа требованиям нормативной документации, вероятностный – обеспечивает объективную количественную оценку геомеханических рисков или надежностей с выходом на получение однозначной результативности по факторам экономической и социальной безопасности, исключает или существенно снижает вероятность внесения излишних затрат. Важное достоинство комплексного метода – резкое снижение трудоемкости разработки программного обеспечения. Для подавляющего большинства геомеханических ситуаций программа детерминированного анализа элементарно трансформируется в имитационном блоке: достаточно детерминированные входные параметры $M(k)$ (здесь k – индекс параметра) заменить на $B1(k, j)$, где $j \in 1, N$ (N – заданное число генераций) и выполнить N вычислений в имитационном цикле.

Детерминированная модель

```
W = 45 * PI / 180
K1 = TAN(W - M(3) / 2)
EA = .5 * M(1) * M(2) * (H * K1) ^ 2
K2 = TAN(W + M(3) / 2)
EP = .5 * M(1) * M(2) * (HT * K2) ^ 2
```

Имитационная модель

```
FOR I = 1 TO NN
K1 = TAN(W - B1(3, I) / 2)
EA = .5 * B1(1, I) * B1(2, I) * (H * K1) ^ 2
K2 = TAN(W + B1(3, I) / 2)
EP = .5 * B1(1, I) * B1(2, I) * (HT * K2) ^ 2
YA(1, I) = EA: YA(2, I) = EP
NEXT I
```

Консервативные результаты детерминированного блока служат для сопоставления с имитационной составляющей и исключения ошибок в ходе имитационного процесса точечным введением средних выборочных $M(k)$ в генерируемый массив имитируемой модели взамен $B1(k, j)$ с последующей временной остановкой программы. Детерминированные коэффициенты запаса, фиксированные нормативные доверительные вероятности, нагрузки смещения и другие показатели страхующего назначения, установленные на практике, составляют значительную долю в системе имитационных критериев оценок геомеханических рисков.

Имитационный конструктор содержит две части, управляемые блоком перехода, исполняющим собственно имитацию или дополнительно оценивающим

значимость δ_k случайных параметров по реализациям общей и частных сверток *шкалы рисков–надежностей*:

$$S_s = \sum_{sk=1}^{m} R_{sk} \cdot G_{sk} \text{ или } S_s = \sum_{sk=1}^{m} N_{sk} \cdot G_{sk},\ S_s \in [1,\ m];$$

$$S_{ki} = \sum_{ki=1}^{m} R_{ki} \cdot G_{ki} \text{ или } S_{ki} = \sum_{ki=1}^{m} N_{ki} \cdot G_{ki},\ S_{ki} \in [1,\ m];\ ki \in [1,\ m],$$

$$\sigma_{ki} = S_s \Big/ \sum_{ki=1}^{m} S_{ki}; \qquad S = \sum_{ki=1}^{m} \sigma_{ki}; \qquad \sigma_k = \sigma_{ki} / S,$$

где S_s – свертка по шкале с учетом всех (m) случайных параметров: R_{sk}, N_{sk}, G_{sk} – риски или надежность, вычисленные по совокупности m случайных параметров; S_{ki}, R_{ki}, N_{ki} – риски или надежность, последовательно вычисленные по одному из m случайных параметров и (m – 1) случайных параметров, замененных на детерминированные значения $M(k)$.

Таблица 2. Результаты комплексного моделирования по «рабочей» версии
Table 2. Integrated modeling results according to the "working" version

Нагрузки, кПа	Исходное число генераций									
	200 000	100 000	50 000	25 000	12 500	6250	3000	1000	500	250
	Число генераций после отбраковки									
	72 811	39 684	20 600	11 810	5784	2764	1006	502	252	250
	Риски									
700	0,040	0,039	0,039	0,040	0,040	0,040	0,034	0,034	0,033	0,028
600	0,125	0,123	0,124	0,125	0,127	0,126	0,116	0,112	0,103	0,096
500	0,343	0,341	0,340	0,337	0,334	0,338	0,034	0,334	0,333	0,320

Данные табл. 2 не позволяют сделать однозначного заключения об эффективности повышения числа генераций до уровней 100 000 и более. См. *ГОСТ Р 54500.3.1-2011. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 1. Трансформирование распределений с использованием метода Монте-Карло. М.: Стандартинформ, 2012. 76 с. (дата актуализации 01.08.2013).*

В имитационном конструкторе предусмотрено использование традиционных генераторов случайных чисел на основе законов нормального, одностороннего нормального, экспоненциального, Вейбулла распределений и нестандартных генераторов по распределению Грамма–Шарлье и бутстреп-тиражированию. Область безусловного применения нормального распределения ограничена вероятностью больше или равно 0,85 гипотезы нормальности, подтверждаемой непараметрическим W-критерием согласия Шапиро–Уилка, устанавливаемым программным путем. Вероятность выше 0,75 обеспечивает ориентировочные суждения о свойствах горных пород и горнотехнических условиях. Нормальное распределение с параметрами: выборочное среднее $\bar{x}$ и стандарт $S = 0{,}3\bar{x}$ для механических и $S = 0{,}15\bar{x}$ для физических характеристик – согласно пункту 5.5 актуализированной редакции ГОСТ 20522-2012 при полном отсутствии выборочной информации можно рекомендовать для использования в учебном процессе с соответствующими разъяснениями. Нормальное распределение безальтернативно, если в имитационную модель вводятся вероятностные трактовки норматив-

ных коэффициентов предельных состояний, полученных по данным обработки многочисленных экспериментов по принципу «трех сигм».

Повышение качества имитационного моделирования достигается многоступенчатой отбраковкой выбросов, ошибок и погрешностей методом Монте-Карло (ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011) [6, 7]:

– *первая ступень* реализует в стадии подготовки исходной информации парадигму непараметрической статистики малых выборок [5] по схеме «локализация выбросов по неравенству Бьенеме–Чебышева – проверка выборки на случайность по критерию Вальда–Вулфовица – бутстреп-генерация – гистограммная оценка плотности распределения». Последняя позволяет судить о целесообразности подгонки распределений или бутстреп-тиражирования исходной выборки в целях генерации исходных параметров;

– *вторая ступень* выполняется непосредственно в подпрограммах генерации случайных чисел по Бьенеме–Чебышеву, очевидным физическим условиям, кадастровым границам литологических разностей с восстановлением начального количества генераций NN в цикле DO … LOOP UNTIL NN;

– *третья ступень*: отбраковка ведется в блоке обработки выходных случайных массивов по Бьенеме–Чебышеву и допустимым физическим уровням;

– *четвертая ступень*: фильтрация выходных массивов по критерию серий.

Таблица 3. Результаты детерминированно-имитационного моделирования
Table 3. Results of deterministic simulation modeling

X, м	$n_з$	Доверительная вероятность	X, м	$n_з$	Доверительная вероятность
7	1,00	0,517	15	1,91	0,956
9	1,26	0,723	17	2,09	0,974
11	1,51	0,864	19	2,27	0,982
13	1,72	0,918	21	2,45	0,992

Базовая версия имитационного конструктора общего назначения насыщена большим количеством потребителей ресурсов операционной памяти, в силу чего предельное количество генераций не может превышать уровни, равные 250–500. Этот недостаток устраняет «рабочая» версия, формируемая из базовой, обеспечивающая N_{og} генерацию от 1000 до 100 000 и более моделируемых случайных чисел. Для ординарного бытового компьютера такие генерации реализуются последовательным генерированием случайных чисел в цикле из серий: $k_m = N_{og}$ / NN, здесь NN – число случайных чисел, генерируемых за один цикл, составляющее от 250 до 500. В программе отключаются операторы PRINT, контрольные точки, демонстрационные и обучающие строки, блоки, подпрограммы, корректируются объявленные размерные массивы, имитируется только один выходной массив (активная нагрузка). Общее число генераций задается в количестве от 250 до 200 000. Во всех рассмотренных вариантах используется одна и та же последовательность случайных чисел от постоянного первого равномерного случайного числа. Табл. 1, 2 поясняют особенности и результативность обеих версий.

Проблема генерации входных случайных чисел и последующих вычислений в сложных геомеханических моделях (например, включающих 10 и более последовательно вычисляемых случайных массивов или 4 и более взаимно связанных случайных массивов) радикально решена переходом на версию имитационного моделирования на языке PHP в среде Cloud Computing (100 000 генераций в минуту).

Рассмотренные материалы являются универсальным инструментом для создания компьютерных технологий моделирования геомеханических решений, реализующих детерминированно-имитационный комплекс на основе методов непараметрической статистики. Целесообразность и преимущества такого подхода демонстрируют три обобщенных примера в многовариантной постановке.

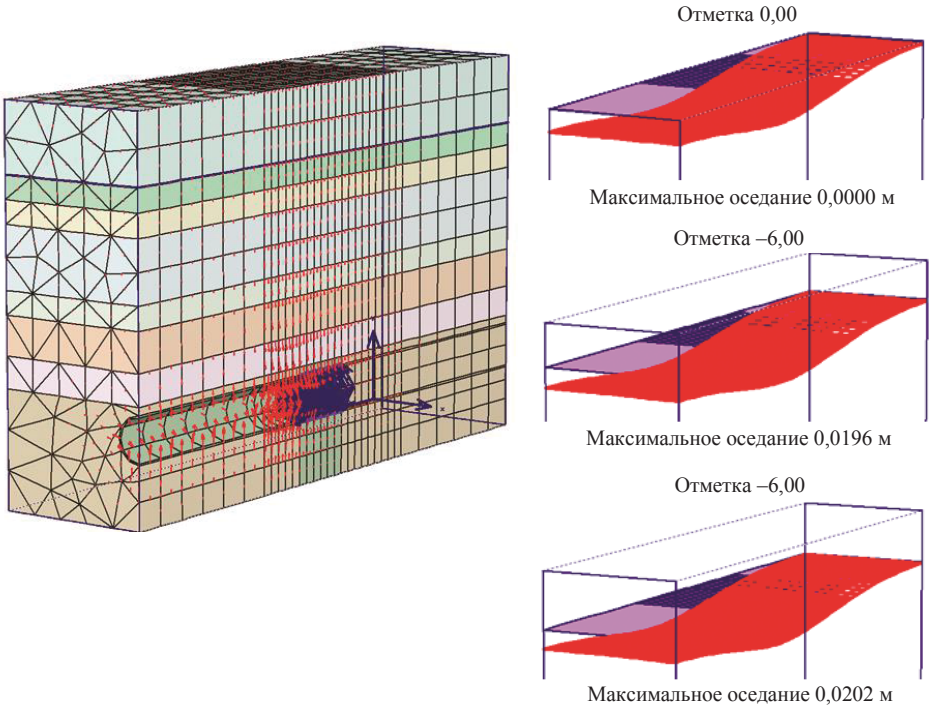


Рис. 1. Вариант расчетной схемы и результатов расчета МКЭ
Fig. 1. A variant of analytic model and FEM results

Моделирование столбчатых целиков по методу Турнера–Шевякова с оптимизацией коэффициента запаса прочности. Модель включает три выделенных случайных параметра $\sigma_{сж}$, γ_0, γ – сопротивление пород целика сжатию, удельный вес пород в целике, средний удельный вес столба пород соответственно:

$$X = A(1 + B / L) \Bigg/ \left(\frac{\sigma_{сж} K_ф K_с K_t}{n_з \gamma H K_\alpha K_н} - \frac{\gamma_0 h_0}{\gamma H} - (1 + B / L) \right),$$

где X – ширина целика; A, B – допустимые пролеты обнажений; L – длина целика; $K_ф$ – коэффициент формы и особенностей контакта целика с вмещающими породами; $K_с$ – коэффициент структурного ослабления пород; K_t – коэффициент длительной прочности пород; h_0 – высота целика; $n_з$ – коэффициент запаса прочности целика; K_α – коэффициент влияния угла падения пласта или залежи; $K_н$ – коэффициент влияния мощности налегающих пород, создающих давление на целик; H – высота столба пород, воздействующих на целик.

Исходные данные: $\sigma_{сж}$ = 50 000 кПа; M(1) = $\sigma_{сж}$; γ_0 = 28 кН/м^3; M(2) = γ_0; γ = 27 кН/м^3; M(3) = γ; S(I) = 0,3M(I); X – варьируемая от 7 до 21 м ширина целика; A = 6 м; B = 6 м; L = 15 м; h_0 = 12 м; $K_с$ = 0,8; K_t = 0,8; K_α = 0,979; $K_н$ = 0,7; H = 500; $n_з$, $K_ф$ – вычисляемые параметры по варьируемым значениям X.

Результаты, полученные при 500 генерациях случайных чисел, трех случайных параметрах, восьми случайных массивах, приведены в табл. 3.

Доверительная вероятность по второй группе предельных состояний составляет 0,85, см. СП 22.13330.2016. Этому требованию отвечает целик шириной 13 м. Вместе с тем оптимальность полученного геомеханического решения должна подтверждаться экономическим сопоставлением потерь полезного ископаемого с потенциальным ущербом – произведением выделенных надежностей и составляющих (неполучение плановой прибыли, увеличение условно-постоянных расходов в себестоимости добычи, убытки от простоев, затраты на локализацию опасной ситуации). Эти составляющие могут оказаться весьма влиятельными, если деформация целика вызывает цепную реакцию последующих разрушений в камере.

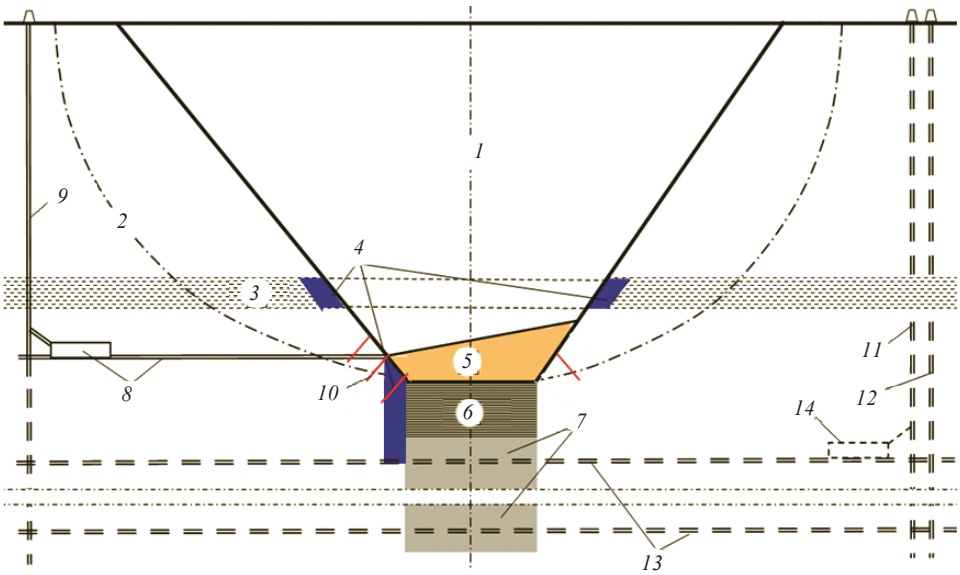


Рис. 2. Схема комбинированной разработки рудного месторождения:
1 – отработанный карьер; 2 – поверхность скольжения борта карьера; *3* – водоносный пласт; *4* – зоны тампонажа; *5* – гидроизоляция из перемятой утрамбованной глины; *6* – барьерный целик; *7* – рудная залежь; *8* – водоотводящая штольня и насосная станция; *9* – вентиляционный ствол с функциями водоотведения и запасного выхода; *10* – контрольные скважины; *11* – клетевой ствол; *12* – скиповой ствол; *13* – выработки горизонтов; *14* – водоотливный комплекс подземного рудника

Fig. 2. Flow sheet of integrated development of an ore field:
1 – abandoned pit; *2* – pit edge glide surface; *3* – water-bearing stratum; *4* – zones of tamping; *5* – waterproofing layer of broken paddled clay; *6* – safety pillar; *7* – ore chute; *8* – drainage adit and pumping plant; *9* – air shaft with the function of water discharge and emergency exit; *10* – observation well; *11* – cage shaft; *12* – skip shaft; *13* – level workings; *14* – underground mine drainage

Принцип обеспечения качества геомеханических решений методами конечных элементов, имитационного моделирования и непараметрической статистики, поясняемый схемой рис. 1, предусматривает: генерацию исходных физико-механических параметров с фиксацией от 8 до 24 случайных величин для каждого параметра с формированием групп вариантных расчетов; детерминированные вариантные конечно-элементные решения по авторитетным программным продуктам; формирование малой выборки из вариантных результатов; тиражирование малой выборки методами «бутстреп» или «складной нож»; имитационное моделирование.

На рис. 1 представлен один из вариантов условий проходки перегонного тоннеля под плотиной городского пруда и результаты расчета мульд сдвижения по

программе PLAXIS 3D TONNEL. Случайная выборка сформирована по оценкам смещений в 10 детерминированных вариантах: 0,0226; 0,0095; 0,0138; 0,0124; 0,0119; 0,0145; 0,0165; 0,0196; 0,0144; 0,0120. Объем тиража составляет 1000 генераций. В имитационную составляющую комплексного моделирования введены нормативные коэффициенты условий работы 1,8 и надежности по ответственности 1,2. Уровни рисков по критериям оседаний 0,02, 0,03, 0,04 м составляют соответственно: 0,032; 0,000; 0,000.

Комплексное моделирование сложной геомеханической ситуации для комбинированной системы разработки месторождения «карьер–подземный рудник», представленной на рис. 2, включает следующие последовательно выполняемые этапы, рассматриваемые в адаптированной форме.

Проверка устойчивости борта карьера. Детерминированная проверка выполняется по формулам, задающим семейство поверхностей скольжения из двух сопряженных дуг «биарков» и оценивающим коэффициенты запаса:

$$R_1 = \frac{(x_B - x_A)\sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2}\right) - (y_B - y_A)\cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_2}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_0}{2}\right)\sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)};$$

$$R_2 = \frac{(x_A - x_B)\sin\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2}\right) - (y_A - y_B)\cos\left(\frac{\varphi_0 + \varphi_1}{2}\right)}{2\sin\left(\frac{\varphi_2 - \varphi_0}{2}\right)\sin\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)};$$

$$\left.\begin{aligned} x_{O1} &= x_A - R_1 \sin\varphi_1 \\ y_{O1} &= y_A + R_1 \cos\varphi_1 \\ x_{O2} &= x_D - R_2 \sin\varphi_2 \\ y_{O2} &= y_D + R_2 \cos\varphi_2 \\ x_S &= R_1 \sin\varphi_0 + x_{01} \\ y_S &= y_{01} - R_1 \cos\varphi_0 \end{aligned}\right\},$$

$$n_з = \left(\sum_{i=1}^{m1} \mathrm{tg}\rho_i N_i + \sum_{j=1}^{m2} c_j L_j\right)\left(\sum_{i=1}^{m1} T_i\right)^{-1},$$

где R_1 и R_2 – радиусы сопряженных дуг; x_{O1}, y_{O1}, x_{O2}, y_{O2} – координаты центров вращения; x_S, y_S – координаты точки сопряжения B двух дуг с радиусами R_1 и R_2 (рис. 3); $\varphi_1 = \alpha - 45° + \rho/2$; $\varphi_2 = 45° + \rho/2$ или $\varphi_2 = \delta - \theta$; $\varphi_0 = (\varphi_2 - \varphi_1)\, n^{-1}$; x_A, y_A, x_D, y_D – координаты начальной и конечной точек криволинейного участка поверхности скольжения; α – угол наклона откоса; ρ – угол внутреннего трения; δ – угол падения поверхности ослабления; θ – угол «встречи» криволинейного участка поверхности скольжения с поверхностью ослабления; $n_з$ – коэффициент запаса устойчивости; N_i – интеграл нормальной составляющей нагрузки по поверхности скольжения; c_j – сцепление; L_j – интеграл длины поверхности скольжения; T_i – интеграл касательной составляющей нагрузки по поверхности скольжения; m_1, m_2 – величины, характеризующие особенности расположения поверхностей скольжения и условия залегания горных пород.

Поверхности скольжения задаются двумя циклами Y (количество «пучков» биарков) и J (количество биарков в пучке). Для каждой поверхности скольжения вычисляется коэффициент запаса устойчивости и находится расчетная поверхность с минимальным коэффициентом запаса (рис. 3).

Исходные данные: удельный вес пород 2,5 тс/м^3; угол внутреннего трения 30°; сцепление 100 тс/м^2; высота борта 500 м; генеральный угол погашения борта 45°. На рис. 3 и в табл. 4 приведены результаты детерминированных вычислений, поверхность с минимальным запасом 1,398 выделена жирным шрифтом.

Для выделенной поверхности с минимальным запасом устойчивости имитационным методом устанавливаются надежность и риск объекта. Надежность N определяется отношением количества случайных чисел в выходном массиве с запасами больше единицы ко всему прогенерированному с учетом отбраковки объему: N = 881/996 = 0,881; риск R = 0,119. Результат детерминированного расчета $n_з$ = 1,398 превышает нормативный коэффициент запаса, составляющий 1,3. Надежность N = 0,881 больше доверительной вероятности 0,85 по второй группе предельных состояний.

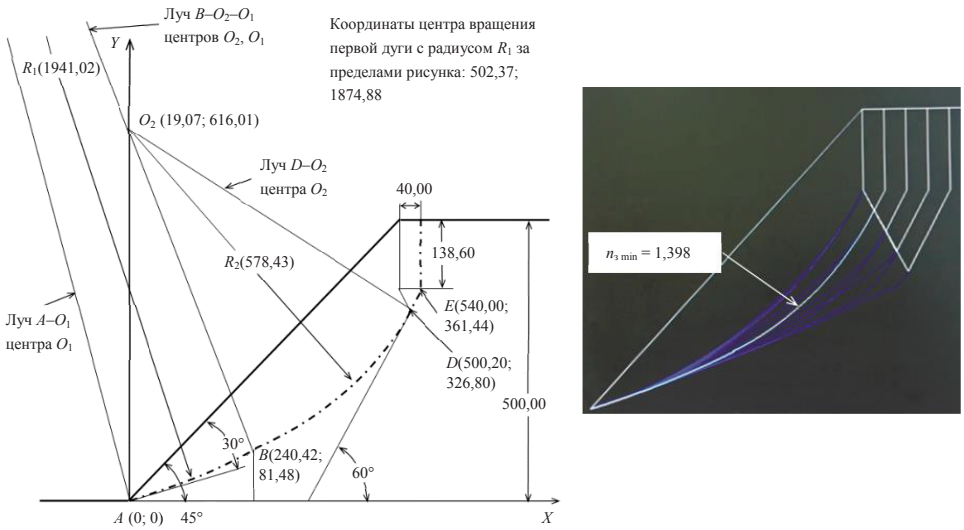


Рис. 3. Построение поверхностей скольжения
Fig. 3. Glide surfaces building

Оценка качества противофильтрационной завесы по остаточному водопритоку $Q_{сум}$, сопровождающемуся непроизводительными затратами и, главное, при больших дебитах – возможностью провоцировать форс-мажор затопления для подземного рудника: формирование шкалы границ (радиусов инъекции) и соответствующих им интервалов и поинтервальных рисков; вариантное определение числа тампонажных скважин; определение суммарной длины «окон» (незатампонированных участков завесы) в соответствии с числом интервалов и границами интервалов; генерация массива вероятных водопритоков через «окна»; генерация массива вероятных водопритоков через тело завесы; суммирование водопритоков (табл. 5); фиксация составляющих ущербов от водопритока.

В состав *мероприятий по предотвращению затопления подземного рудника* входят возведение гидроизоляционного слоя *5* (см. рис. 2) над барьерным целиком *6*, строительство шахтного водоотливного комплекса *8*, проходка вентиляционного ствола *9* с функцией запасного выхода и с размещением ставов труб для

карьерного водоотлива (хорошей альтернативой классическому шахтному водоотливу может стать дренажный узел, оснащенный погружными насосами по типу дренажных узлов Североуральского бокситового бассейна, успешно эксплуатируемых в течение нескольких десятков лет). Особое значение приобретает оценка состояния степени разрушенности пород в предельном контуре карьера на контакте с гидроизоляцией *5* как зоны потенциальной опасности прорыва карьерных вод в подземные горные выработки.

Таблица 4. Коэффициенты запаса устойчивости борта
Table 4. Open pit was stability factor

Цикл *Y*	Цикл *J*	$n_з$	Цикл *Y*	Цикл *J*	$n_з$	Цикл *Y*	Цикл *J*	$n_з$	Цикл *Y*	Цикл *J*	$n_з$
1	1	1,423	2	1	**1,398**	3	1	1,445	4	1	1,547
	2	1,428		2	1,407		2	1,445		2	1,549
	3	1,433		3	1,413		3	1,457		–	–
	4	1,436		4	1,416		–	–		–	–

Ширина призмы скольжения на верхней берме карьера 40 м.

Обеспечение геомеханического качества барьерного целика выполняет совмещенный детерминированно-имитационный расчет барьерного целика *6*, выполненный с варьированием его мощности в долях от полупролета с внешней нагрузкой от высоты столба воды, сформировавшегося в карьере при форс-мажорной интенсивности дождя, остаточного водопритока и мощности изолирующего слоя *5*.

Таблица 5. Оценка остаточных водопритоков через противофильтрационную завесу
Table 5. Residual influx evaluation through the grouting

Радиус инъекции R_j, м	Число скважин $N_с$	Водоприток на объект, м^3/сут		
		через «окна» $Q_{1С}$	через завесу $Q_{2С}$	общий $Q_{сум}$
–	–	276,60	–	276,60
1,709	390	–	84,08	84,08
2,352	282	3,36	83,07	86,43
2,975	224	22,50	77,25	99,75
3,909	171	68,93	63,14	132,07

Принимая для однорядной завесы вероятность $P_1 = Q_{сум1}$ /276,6, для двухрядной линейной завесы показатели надежности W_2 и риска P_2 составят: $W_2 = 2(1 – 0,477) – (1 – 0,477)^2 = 0,772$; $P_2 = 1 – 0,772 = 0,228$. Остаточный водоприток через двухрядную завесу составит: $Q_{сум2} = 276,6 \cdot 0,228 = 63,1$ м^3/сут. Аналогично для трехрядной завесы: $W_3 = 0,891$, $P_3 = 0,109$; $Q_{сум3} = 276,6 \cdot 0,109 = 30,1$ м^3/сут.

На завершающем этапе моделирования геомеханических решений для компонентов комбинированной системы разработки месторождения на основе версий имитационного конструктора формируются компьютерные технологии устойчивых обнажений, прочности опорных и междукамерных целиков. Постановка, структура и реализация этих геомеханических решений для объектов подземных очистных выработок идентичны изложенным материалам по оптимизации столбчатого опорного целика.

Область применения – горнотехнические сооружения строительной, подземной, открытой, комбинированных технологий горнодобывающих предприятий и

специфических объектов освоения подземного пространства в различных отраслях народного хозяйства.

Выводы. Компьютерные технологии моделирования геомеханических ситуаций на основе комплекса детерминированных, имитационных методов и процедур непараметрической статистики малых выборок вносят решающий вклад в систему оценивания и обеспечения качества геомеханических решений, не имеющую аналогов [8–11]. Отмечается универсальность формирования компьютерных технологий с использованием имитационного конструктора – базовой программы, предназначенной для конструирования, отладки, испытания новых детерминированно-вероятностных моделей, предусматривающей выполнение демонстрационной, обучающей, исследовательской функций, резервирования процесса и результатов моделирования, купирования погрешностей и недостатков имитации по методу Монте-Карло. Предлагаемые программные разработки доступны широкому кругу пользователей, поскольку не нуждаются в специальных продуктах типа ANYLOGIC, ARENA, ARIS, GPSS, ITHINK [12–14] и функционируют в среде стандартизированных языков Q-BASIC, QB-64, PHP на рядовых ЭВМ с тактовой частотой 2,1 ГГц без существенных утрат в оперативности. Основная версия имитационного конструктора в интерактивном режиме выполняется в течение 6 мин, рабочая версия с 200 000 генераций – в течение 35 мин, для непараметрической подготовки исходных выборок необходимо от 1,5 до 3 мин, геомеханические решения в подавляющем большинстве требуют до 5–12 мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архипов А. Последний путь рудника «Мир»: исследование причин катастрофы 4 августа 2017 г. СПб: Политехника, 2019. 264 с.

2. Половов Б. Д., Волков М. Н. Имитационная геомеханика // Известия Уральской государственной горно-геологической академии. 2002. Вып. 14. С. 107–123.

3. Волков М. Н., Половов Б. Д., Романов Д. А. Непараметрическая оценка физико-технических свойств грунтов на стадии проектирования // ГИАБ. Строительная геотехнология. 2010. Отд. вып. 6. С. 112–123.

4. Половов Б. Д., Волков М. Н., Михайлов Д. В., Романов Д. А., Токарев П. К., Харченко Д. И. Геомеханический анализ горнотехнических объектов: точки роста // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 7. С. 40–50.

5. Половов Б. Д., Валиев Н. Г. Геомеханический анализ горнотехнических объектов на основе методов непараметрической статистики. Екатеринбург: УГГУ, 2015. 272 с.

6. Фалин Г. И. Метод Монте-Карло в теории риска. URL: https://www.math/msu.su.htm/ (дата обращения: 23.09.16).

7. Гильванова Г. А. Анализ риска инновационного проекта методом имитационного моделирования (метод Монте-Карло) // Материалы конференции КазНИТУ. 2015. № 12(34). С. 157–161.

8. Власов М. В. Имитационное моделирование. Новочеркасск: Политехника, ЮРГУУ (НПИ), 2016. 60 с.

9. Vasiliy V. Simoviev, Aleksey N. Starodubov, Mixail U. Dorofeev, Victor V. Okolnishkov. Simulation Application for evaluatuon of effiicciency of mining systems automatization // WSEAS Transactions on Systems. 2015. Vol. 14. Art. 24. P. 261–267.

10. Кравчук С. В., Стародубов Ф. Р. Разработка системы имитационного моделирования очистных горных работ // Россия молодая: сб. матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. 18–21 апреля 2017. Кемерово, 2017. С. 1–5.

11. Норникель создал систему имитационного моделирования для планирования подземных горных работ. URL: https://lenta.ru/articles/2019/10/10/nornikel/ (дата обращения: 22.11.2019).

12. Discrete event simulation software. URL: https://www.arenasimulation.com (дата обращения: 22.11.2019).

13. Simulink. URL: https://matlab.ru//produtsimulink (дата обращения: 22.11.2019).

14. Почему Anylogic? URL: https://www.anylogic.ru/features (дата обращения: 22.11.2019).

Поступила в редакцию 26 декабря 2019 года

Сведения об авторах:

Волков Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент, декан горно-технологического факультета Уральского государственного горного университета. E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru
Половов Борис Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Уральский государственный горный университет. E-mail: boris.polovov.37@yandex.ru

Прищепа Дмитрий Вячеславович – ассистент кафедры шахтного строительства Уральского государственного горного университета. E-mail: dmitriy.prishchepa@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

Information technologies of geomechanical events integrated simulation

Maksim N. Volkov [1], Boris D. Polovov [1], Dmitrii V. Prishchepa[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Neither national nor foreign practice can guarantee high-quality assessment of enclosing rock mass state and reliable substantiation of rational geomechanical solutions. It is confirmed by actual accident and breakdown rates including catastrophic force majeure. So, current methods of geomechanical analysis need principal improvement.*

Research aim *is to develop information technologies of integrated deterministic stochastic modeling within the system of assessing and ensuring the quality of geomechanical solutions, which is the set of interconnected estimates and indicators, such as efficient, available, reliable and adequate information on enclosing rock mass properties and state, compliance with the requirements of normative documents, geomechanical risks rates by the factors of breakdown, accident and environmental hazard factors, potential damage from risk aftermath, financial receipts and expenses which include dominant functions of potential damage and monitoring effectiveness.*

Methodology. *Research has been carried out based on the simulation builder, basic software aimed at design, checkout and probation of new integrated deterministically stochastic models of geomechanical events. The models fulfill research, training and demonstration functions, reserve modeling process and output, simulation errors and drawbacks elimination by Monte Carlo method. The main feature of the builder is the availability of interconnected components, determination and simulation. Such complex provides the researcher with important complementary information: deterministic method fulfills safety functions and determines analysis results non-contradiction to the requirements of normative documentation; probabilistic method ensures objective evaluation of geomechanical risks or safe features with the possibility to obtain clear effectiveness by the factors of economic and social security, eliminates or significantly reduces the probability of unnecessary expenses. The universality of the approach to creating information technologies of geomechanical solutions simulation which implement the deterministic simulation complex based on the methods of nonparametric statistics is confirmed by the instances of simulation in multivariate statement.*

The scope of the investigation *includes mine engineering structures of construction, open, integrated technologies of mining enterprises and specific underground development targets in various sectors of national economy.*

Summary. *Information technologies of geomechanical events simulation based on the complex of deterministic and simulation methods and the procedures of nonparametric microstatistics make decisive contribution in the system of assessment and ensuring the quality of geomechanical solutions. The universality of IT development is noted together with their availability for a wide range of users, their simplicity and implementation efficiency.*

Key words: *information technologies; deterministic simulation modeling; nonparametric statistics; quality; geomechanical solutions; simulation builder; generation; random numbers; risk; criteria.*

REFERENCES

1. Arkhipov A. *Research into the causes of catastrophe at the Mir mine, 4 August 2017*. St. Petersburg: Politekhnika Publishing; 2019. (In Russ.)

2. Polovov B. D., Volkov M. N. Simulation geomechanics. *Izvestiia Uralskoi gosudarstvennoi gorno-geologicheskoi akademii = Proceedings of Ural State Mining and Geological Academy*. 2002; 14: 107–123. (In Russ.)

3. Volkov M. N., Polovov B. D., Romanov D. A. Nonparametric estimate of physical and technical properties of soils at the stage of design. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal). Stroitelnaia geotekhnologiia = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). Construction Geotechnology*. 2010; Fascicle 6: 112–123. (In Russ.)

4. Polovov B. D., Volkov M. N., Mikhailov D. V., Romanov D. A., Tokarev P. K., Kharchenko D. I. Geomechanical analysis of mining facilities: points of growth. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. *Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 7: 40–50. (In Russ.)

5. Polovov B. D., Valiev N. G. *Geomechanical analysis of mine technical facilities based on the methods of nonparametric statistics*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2015. (In Russ.)

6. Falin G. I. *Monte Carlo method in a theory of risk*. Available from: www.math/msu.su.htm [Accessed 23 November 2016]. (In Russ.)

7. Gilvanova G. A. Innovative project risk analysis by the method of simulation modeling (Monte Carlo method). In: *Satbayev University conference proceedings*. 2015; 12(34): 157–161. (In Russ.)

8. Vlasov M. V. *Simulation modeling*. Novocherkassk: SRSPUU (NPI) Publishing; 2016. (In Russ.)

9. Vasiliy V. Simoviev, Aleksey N. Starodubov, Mixail U. Dorofeev, Victor V. Okolnishkov. Simulation Application for evaluatuon of effiicciency of mining systems automatization. WSEAS *Transactions on Systems*. 2015; 14 (24): 261–267.

10. Kravchuk S. V., Starodubov F. R. Developing the system of stoping simulation modeling. In: *Young Russia: proceedings of the 9th All-Russian sci.-pract. conf. with international participation, 18–21 April 2017*. Kemerovo: 2017. p. 1–5. (In Russ.)

11. *Nornikel has created a system of simulation modeling for mine planning*. Available from: lenta.ru/articles/2019/10/10/nornikel [Accessed 22 November 2019]. (In Russ.)

12. Discrete event simulation software. Available from: www.arenasimulation.com [Accessed 22 November 2019].

13. *Simulink*. Available from: https://matlab.ru//produtsimulink [Accessed 22 November 2019].

14. *Why Anylogic*? Available from: https://www.anylogic.ru/features [Accessed 22 November 2019].

Received 26 December 2019

Information about authors:

Maksim N. Volkov – PhD (Engineering), Associate Professor, Dean of the Mining Technology Faculty, Ural State Mining University. E-mail: maksim.volkov@m.ursmu.ru

Boris D. Polovov – DSc (Engineering), Professor, Ural State Mining University. E-mail: boris.polovov.37@yandex.ru

Dmitrii V. Prishchepa – assistant lecturer, Department of Shaft Construction, Ural State Mining University. E-mail: dmitriy.prishchepa@m.ursmu.ru

Для цитирования: Волков М. Н., Половов Б. Д., Прищепа Д. В. Компьютерные технологии комплексного моделирования геомеханических ситуаций // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 40–53. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

For citation: Volkov M. N., Polovov B. D., Prishchepa D. V. Information technologies of geomechanical events integrated simulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 40–53 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-40-53

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-54-61

Independent particle and lot selection of increment samples in the theory of sampling

Vladimir Z. Kozin[1]*, Aleksei S. Komlev [1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
e-mail: gmf.dek@ursmu.ru

Abstract

Introduction. *The theory of sampling developed by Pierre Gy does not prove the compatibility and consistency of discrete and continuous selection models. Discrete (independent particle) and continuous (lot) selection models are determined by incompatible properties of increment samples, which prevented from creating the consistent theory of sampling.*

Research methodology. *The inconsistencies are removed at assuming the idea that there are differences in both separate ore lumps or mineral-dressing products and any locally selected parts of the rock mass under test called increment samples simultaneously available in any rock mass under test. The said differences are described by independent particle dispersion and increment samples dispersion. Composite sample permissible error formed in both discrete and continuous selection is attained by selection of the number of particles collected into the increment sample or their parts and the number of increment samples. Particle dispersion, increment sample dispersion, the number of particles in an increment sample and the number of increment samples combined in one formula make up the complete formula of the fundamental sampling error.*

The development of the theory of sampling. *Based on the complete formula, the possibility of obtaining minimum masses of various sizes has been shown. Thus, for one and the same preset permissible error and from one and the same massif under test, it is possible to collect minimum mass of 17.55 kg (individual particle selection), minimum mass of 170.3 kg (collecting with the bucket sampler), and minimum mass of 10 g under the individual particle selection of particle parts (which is fulfilled under X-ray fluorescent on-stream analysis of material). Discrete selection of increment samples without particles destruction is an especial case of continuous selection method when it is possible to accept the condition that increment samples dispersion is equal to zero. It is possible under ideal mixing of the massif under test.*

Discussion. *Minimum mass of a sample is not a constant. It is a function of increment sample mass. Minimum mass in individual particle selection can be accepted as a reference value of the minimum mass. In lot selection it can be significantly higher than the reference one, while in case of reducing particle size it can be significantly lower than the reference one.*

Key words: *fundamental sampling error; minimum sample mass.*

Introduction. A basic theory of sampling (TOS) [1] providing a basis for the international standards [2, 3] is subject to strong criticism. It is particularly stated that "the theory of Gy fails to provide theoretical and/or experimental proof that two of its major theoretical parts, namely the discrete selection model and the continuous selection model, are compatible and inconflicting" [4].

Both selection models are based on different theoretical prerequisites. Discrete sampling is considered as selection of ideally mixed massif, which makes it possible to deduce a formula of the "fundamental" sampling error (FSE) based on the classical formula of mean dispersion. Transition to continuous selection requires the introduction

of a new parameter of the massif under test characterizing its heterogeneity (the state of being not mixed) which is not considered as a fundamental characteristic. Despite numerous "updates" in the theory, the link between these two selection models has not been revealed and remains unclear [5, 6].

D. S. Dihalu and B. Geelhoed [4] criticized the theory of sampling in especially dramatic fashion. They claim that the existing theory is week and contains numerous correction factors being not practical enough which impedes or totally eliminates it practical application.

Indeed, after the fullest presentation of Pierre Gy's theory had been printed in the English language in 1979 and 1982 [1], more than 250 research works [5–8] were published amplifying and refining the theory. Considering the cumbersomeness and complexity of the theory together with undefined or declared coefficients, it should be concluded that the theory is not practical and prevents engineers from making strong calculations and conclusions on sampling.

Alternative and practical theory of sampling was developed independently of Pierre Gy's works based on fundamental distributions of mass fraction in individual particle selection of increment samples and typical particle particles as well as with the use of engineeringly validated reductions and experimental validation of the coefficients used. It has been shown that the theory of sampling must not only ensure random errors calculation but also the accuracy of sampling results, i. e. the absence of the systematic error; it must also consider the asymmetrical distribution of mass fractions in increment samples. New errors have been injected: probable systematic and procedural errors not considered in the sampling standards [9]. Duplicate sampling [10] and the methods of determining and using the coefficients of variation [11] were criticized; alternative solutions were proposed.

As it was justly noted in work [4], "utopically, a complete and flawless theory of sampling would be a correct synthesis of the insights of the major scientists that have made their contributions throughout the years. We propose to use the term "Theory of Sampling", or "TOS", for such a perfect and complete to-be developed theory".

This article will provide a complete formula of the fundamental sampling error which is absent in Pierre Gy's theory and shows the compatibility and consistency of discrete and continuous selection models together with the theory's development which reveals the dependence between the composite samples minimum masses and increment samples masses.

Research methodology. The theory of sampling is based on random errors calculation and the determination of sample masses which ensure the permissible error. The existing theory considers the fundamental error of discrete selection and the error of continuous selection to be independent and totally unrelated. This is a critical weakness of the theory. Sampling is always related to two fundamental parameters of the massif under test, as soon as we can observe:

– difference between individual particles which make up the massif under test; this difference is called individual particles dispersion S_{p}^2;

– difference between individual increment samples which contain n_{incr} of particles collected from the massif; this difference is described by increment samples dispersion S_{incr}^2.

The two indicated characteristics are congruent in individual particle selection of increment samples, i. e. under $n_{\text{incr}} = 1$. In this case $S_{\text{incr}}^2 = S_{\text{p}}^2$ and the sampling error is determined by the number of increment samples N_{incr}:

$$S_{\alpha}^2 = \frac{S_{\text{p}}^2}{N_{\text{incr}}} = \frac{S_{\text{incr}}^2}{N_{\text{incr}}}.$$

In case the massif under test is ideally mixed, then $S_{\text{incr}} = 0$, the fundamental error will be predetermined only by the difference in particles, and N_{incr} may be accepted as equal to one, then:

$$S_{\alpha}^{2} = \frac{S_{\text{p}}^{2}}{n_{\text{incr}}}.$$

This instance is congruent with Pierre Gy's Fundamental Sampling Error (FSE).

As soon as the number of particles selected into the increment sample n_{incr} is predetermined by the sampling conditions (by samplers), and S_{incr} cannot be equal to zero, as a result the fundamental error is predetermined by the difference both in the particle S_{p}^{2} and increment samples S_{incr}^{2}:

$$S_{\alpha}^{2} = \frac{1}{N_{\text{incr}}}\left(\frac{S_{\text{p}}^{2} - S_{\text{incr}}^{2}}{n_{\text{incr}}} + S_{\text{incr}}^{2}\right) \tag{1}$$

and will be determined by both S_{p}^{2}, так и S_{incr}^{2}.

This expression is the demonstration of discrete and continuous selection models compatibility and consistency being a complete formula of the fundamental sampling error.

In the theory of sampling it is artificially separated assuming that there is instance $S_{\text{incr}}^{2} = 0$ and instance $S_{\text{p}}^{2} / n_{\text{incr}} = 0$.

But it is not so, individual particle dispersion S_{p}^{2} is high, and despite n_{incr} being usually high as well, both items in formula (1) can be comparable.

Example: $\alpha = 2$ g/t; $\rho_{\text{m}} = 18\,000$ kg/m^3; $\rho_{\text{r}} = 3000$ kg/m^3; $\beta_{\text{m}} = 10^6$ g/t; $d_{\max} = 0.5$ mm. Where: α – mass fraction of gold in ore; ρ_{r} и ρ_{m} – rock and mineral (gold) density; $d_{\max}$ – the size of the material under test; β_{m} – mass fraction of gold in pure metal.

Individual particle dispersion of the exposed material under test is

$$S_{\text{pt}}^{2} = \frac{\rho_{\text{m}}}{\rho_{\text{r}}}\alpha\,\beta_{\text{m}} = \frac{18000}{3000}\cdot 2\cdot 10^{6} = 12\cdot 10^{6}\ \left(\text{g/t}\right)^{2}.$$

The coefficient of variation is usually $V_{\text{incr}} = 50\%$, then increment samples dispersion is

$$S_{\text{incr}} = \frac{V_{\text{incr}}\alpha}{100\ \%} = \frac{50\ \%\cdot 2}{100\ \%} = 1\ \text{g/t}.$$

$N_{\text{incr}} = 100$ of increment samples with the mass of 0.5 kg has been collected.

The number of particles in the increment sample is

$$n_{\text{incr}} = \frac{q}{f\rho d^{3}} = \frac{0.5}{0.2\cdot 3000\cdot (0.5\cdot 10^{-3})^{3}} = 6.7\cdot 10^{6}.$$

Then $S_{\alpha}^{2} = \dfrac{1}{100}\left(\dfrac{12\cdot 10^{6} - 1}{6.7\cdot 10^{6}} + 1\right) = \dfrac{1}{100}(1.8 + 1) = 0.028\ (\text{g/t})^{2}.$

So, discrete and continuous selection models are synthesized in one formula (1), discrete selection model being an especial case of continuous selection model, when $S^2_{\text{incr}} = 0$ is accepted.

The development of the theory of sampling. Based on the fundamental error, the sample mass is given by

$$q = q_{\text{incr}} \cdot N_{\text{incr}} = q_{\text{incr}} \frac{\left(S^2_{\text{p}} - S^2_{\text{incr}} / n_{\text{incr}}\right) + S^2_{\text{incr}}}{S^2_{\alpha\text{perm}}} = \frac{S^2_{\text{p}}}{S^2_{\alpha\text{perm}}} q_{\text{p}} + \frac{S^2_{\text{incr}}}{S^2_{\alpha\text{perm}}}\left(q_{\text{incr}} - q_{\text{p}}\right) = q_0 + \Delta q.$$

Minimum sample mass in the discrete selection model is q_0 ($q_{\text{incr}} = q_{\text{p}}$) is predetermined by individual particle dispersion, permissible error and the number of particles selected into the sample.

Minimum sample mass in the continuous selection model increases by the value of Δq which depends on the dispersion of increment samples and increment sample mass.

But into the increment sample [12–14] a part of a particle Δq_{p} can be selected, and in this case

$$q = \frac{S^2_{\text{p}}}{S^2_{\alpha\text{perm}}} \Delta q_{\text{p}} = N_{\text{incr}} \cdot \Delta q_{\text{p}} = \Delta q_0.$$

Consequently, minimum sample mass can be less than q_0, and under $\Delta q_{\text{p}} << q_{\text{p}}$ it can be low enough, in particular it can be equal to the sample weights for the analysis.

Note that the number of increment samples in N_{incr} in this case is predetermined by the individual particle dispersion S^2_{p} and will be very high.

In order to estimate the ratios of q_0, Δq and Δq_0 let us consider the following example.

Example: copper ore which enters the mill; $d_{\max} = 15$ mm; $d_{\text{g}} = 1.2$ mm; $b = 1.5$; $\alpha = 0.8\%$; $\beta_{\text{m}} = 34.6\%$; $\rho_{\text{m}} = 4100$ kg/m^3; $\rho_{\text{r}} = 3000$ kg/m^3; $f = 0.4$; $P_{\text{perm}} = 3.5\%$. Here $d_{\max}$ is the size of the sampled rock; d_{g} is the size of copper mineral grains; b – impregnation index (heterogeneous impregnation); α – mass fraction of copper in ore; β_{m} – mass fraction of copper in the copper mineral (chalcopyrite); ρ_{m} – the density of the copper mineral; ρ_{r} – rock density; f – form factor; P_{perm} – permissible relative sampling error.

Minimum mass under the individual particle selection is q_0.

Lump dispersion of clusters is

$$S^2_{\text{p}} = S^2_{\text{pt}}\left(\frac{d_{\text{g}}}{d}\right)^{3-b} = \frac{\rho_{\text{m}}}{\rho_{\text{r}}}\alpha\beta_{\text{m}}\left(\frac{d_{\text{g}}}{d}\right)^{3-b} = \frac{4100}{3000} \cdot 0.8 \cdot 34.6\left(\frac{1.2}{15}\right)^{3-1.5} = 0.86\%^2.$$

Permissible RMS error is

$$\text{S}_{\alpha\text{perm}} = \frac{P_{\text{perm}}\alpha}{2 \cdot 100} = \frac{3.5 \cdot 0.8}{2 \cdot 100} = 0.014\%.$$

Lump mass is

$$q_{\text{p}} = f\rho_{\text{r}} d_{\max}{}^3 = 0.4 \cdot 3000\left(15 \cdot 10^{-3}\right)^3 = 0.004 \text{ kg}.$$

Minimum mass under ideal mixing is

$$q_0 = \frac{S_{\text{p}}^2}{S_{\alpha\text{perm}}^2} q_{\text{p}} = \frac{0.86}{0.014^2} \cdot 0.004 = 17.55 \text{ kg}.$$

The number of increment samples N_{incr} in the individual particle selection method equal to the number of particles in the composite sample is 4388.

Minimum sample mass in continuous selection model. If a bucket sampler was applied to collect increment samples, then the increment sample mass is predetermined by its structure and is calculated according to the formula:

$$q_{\text{incr}} = \frac{Qb}{\vartheta} = \frac{130 \text{ t/h} \cdot 50 \text{ mm}}{0.6 \text{ m/s}} = 3 \text{ kg},$$

where Q is the productivity, 130 t/h; b is the width of the samplers' slit, 50 mm; ϑ is the speed of the bucket crossing the ore flow, $\vartheta = 0.6$ m/s.

The dispersion of 3 kg increment samples is determined by experiment and makes up $S_{\text{incr}}^2 = 0.01\%^2$. The number of the increment samples

$$N_{\text{incr}} = \frac{S_{\text{incr}}^2}{S_{\text{perm}}^2} = \frac{0.01\%^2}{0.014^2} = 51.$$

Minimum mass is

$$q = q_0 + \Delta q = q_0 + N_{\text{incr}}(q_{\text{incr}} - q_{\text{p}}) = 17{,}55 + 51(3 - 0.004) = 170.3 \text{ kg}.$$

The use of the sampler only has led to the minimum sample mass of 170.3 kg for one and the same massif, which significantly exceeds the minimum mass of 17.55 kg under the individual particle selection of increment samples.

Minimum sample mass under under increment samples collection with particle destruction. If for increment samples a part of a partilce with the mass of $\Delta q_{\text{p}} = 0.000001$ kg will be collected, then minimum mass of the composite sample will be by an order less.

Particles of such size (dust motes) will be exposed, and for them individual particle dispersion is

$$\text{S}_{\text{pt}}^2 = \frac{\rho_{\text{m}}}{\rho_{\text{r}}} \alpha\beta_{\text{m}} = \frac{4100}{3000} \cdot 0.8 \cdot 34.6 = 37.8\%^2.$$

The number of increment samples of dust motes will be equal to

$$N_{\text{incr}} = \frac{S^2{}_{\text{pt}}}{S_{\text{perm}}^2} = \frac{37.8}{0.014^2} = 193\,000.$$

Minimum mass in this case is

$$\Delta q_0 = \frac{S_{\text{pt}}^2}{S_{\alpha\text{perm}}^2} \cdot \Delta q_{\text{p}} = \frac{37.8\%^2.}{0.014^2\%^2.} \cdot 0.000001 \text{ kg} = 0.01 \text{ kg}.$$

As we can see, everything depends on the choice of the particles number (or particle fraction), collected into the increment sample, i. e. on its mass. There can be any increment sample mass, and as a rule, it depends on the chosen instrument for sampling.

Discussion. Discrete (individual particle) selection method makes it possible to obtain the minimum mass q_0, which depends only on the mass the particles q_p and their properties characterized by the individual partilces dispersion S_p^2 .

Continuous (lot) selection model results in the increase in the composite sample minimum mass by the value of Δq, which depends on the increment sample mass qincr and increment samples dispersion S_{incr}^2 under significant reduction of increment samples number N_{incr}.

Discrete selection of particle parts Δq_p results in the reduction of the sample mass up to value Δq_0 which depends on the mass of the particle Δq_p which is collected into the increment sample and increment samples dispersion S_{pt}^2 under significant increase in the number of increment samples N_{incr}.

There can be any minimum mass of the composite sample of one and the same massif under test, from tiny (10 g) to large (170.3 kg). Everything depends on the chosen mass of the increment sample.

It should be noted that the indicated samples: 10 g, 17.55 kg and 170.3 kg were collected with the same permissible random error of 3.5%, but in the first instance 193000 increment samples were collected, in the second instance – 4388, and 51 in the third.

Summary. The theory of sampling, based on the idea about the primary nature of increment sample mass which may be randomly picked, it can be a part of a lump or the whole lump or a set of lumps, is consistent. The composite sample selection error for any increment sample mass is described by one formula (1) which includes the number of particles in the increment sample n_{incr} and the number of increment samples N_{incr} together with the individual partilces dispersion and increment samples dispersion.

Increment sample mass depends only on the sampler chosen for samples collection. As soon as increment sample mass can be changed within wide range, minimum mass can also change in wide range.

Discrete (individual particle) selection model is an especial instance of continuous (lot) selection model when the composite sample can be collected as the increment sample due to ideal mixing. Ideal mixing is not an obligatory condition as soon as the same sample may be collected with individual increment samples.

REFERENCES

1. Gy. P. *Sampling of particulate material: theory and practice*. Elsevier: Amsterdam; 1979 and 1982. 431 p.

2. Holmes R. J. Challenges of developing ISO sampling standards. *Fifth World Conference on Sampling and Blending. Conference Proceedings*. Gecamin Ltda, 2011. P. 57–63.

3. Esbensen K. H., Minkkinen P. Illustrating Sampling standards – how to guarantee complete understanding and TOS – compliance? *Fifth World Conference on Sampling and Blending, Conference Proceedings*. Gecamin Ltda, 2011. P. 383–392.

4. Dihalu D. S., Geelhoed B. A. *Critique of Gy's Sampling Theory*. Available from: http://vixra.org/abs/1203.0081

5. Richard Minnitt, Kim H. Esbensen. *Pierre Gy's development of the Theory of Sampling: a retrospective summary with a didactic tutorial on quantitative Sampling of one – dimensional lots*. Available from: https//www.researchgate.net//publication/314234218

6. Geelhoed B. *Approaches in Material Sampling*. Delft University Press; 2010. 152 p.

7. Geelhoed B. Is Gy's Formula for the fundamental sampling error accurate? Experimental evidence. *Minerals Engineering*. 2011; 24(2): 169–173.

8. Dihalu D. S., Geelhoed B. A new multi-axial particle shape factor – application to particle sampling. *Analist*. 2011; 136(18): 3783–3788.

9. Kozin V. Z. *Sampling of mineral raw material*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2011. (In Russ.)

10. Kozin V. Z., Komlev A. S., Stupakova E. V. On the use of duplicate testing to estimate random errors. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2019; 6: 35–40. (In Russ.)

11. Kozin V. Z., Komlev A. S. Determination of variation coefficients of a mass part of components in concentration products. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2019; 1: 28–33. (In Russ.)
12. Liapin A. G. Engineering analytical control over mineral production and processing process. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2009; 4: 14–16. (In Russ.)
13. Morozov V. V., Stoliarov V. F., Konovalov A. M. Improving the effectiveness of flotation control with the use of on-stream analyzers of pulp composition. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2003; 4: 33–36. (In Russ.)
14. Zaitsev V. A., Makarova T. A., Barkov A. V., Bakhtiiarov A. V., Moskvin L. N. Non-destructive control of the composition of polymetallic ore and concentrates. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 2006; 8: 60–67. (In Russ.)

Received 10 March 2020

Information about authors:

Vladimir Z. Kozin – DSc (Engineering), Professor, Dean of the Mining Engineering Faculty, Ural State Mining University. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru
Aleksei S. Komlev – PhD (Engineering), senior researcher of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tails2002@inbox.ru

УДК 622.7.09:620.113 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-54-61

Покусковой и многокусковой отбор точечных проб в теории опробования

Козин В. З.[1], Комлев А. С.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Реферат
Введение. *В теории опробования, разработанной Пьером Жи, нет доказательств совместимости и непротиворечивости дискретного и непрерывного отбора проб. Дискретный (покусковой) и непрерывный (многокусковой) отбор проб определяются несовместимыми свойствами точечных проб, что не позволяло создать непротиворечивую теорию отбора проб.*
Методология исследования. *Противоречия снимаются при принятии положения об одновременном наличии в любом опробуемом массиве различий как отдельных кусков руды или продуктов обогащения, так и любых локально выделяемых частей опробуемого массива, называемых точечными пробами. Эти различия описываются покусковой дисперсией и дисперсией точечных проб. Достижение допустимой погрешности объединенной пробы, формируемой как при дискретном, так и при непрерывном отборе, обеспечивается выбором отбираемого в точечную пробу числа кусков или их частей и числа точечных проб. Обобщение в одной формуле покусковой дисперсии, дисперсии точечных проб, числа кусков в точечной пробе и числа точечных проб и составляет полную формулу фундаментальной погрешности опробования.*
Развитие теории опробования. *На основе полной формулы показана возможность получения минимальных масс разной величины. Так, для одной и той же заданной допустимой погрешности от одного и того же опробуемого массива можно отобрать минимальную массу 17,55 кг (покусковой отбор), минимальную массу 170,3 кг (отбор с помощью ковшового пробоотбирателя) и минимальную массу 10 г при покусковом отборе частей кусков (что выполняется при рентгенофлюоресцентном анализе материала в потоке). Покусковой отбор точечных проб без разрушения кусков является частным случаем непрерывного отбора, когда можно принять условие, что дисперсия точечных проб равна нулю. Это возможно при идеальном перемешивании опробуемого массива.*
Обсуждение результатов. *Минимальная масса пробы не является постоянной величиной. Она является функцией массы точечной пробы. Опорной величиной минимальной массы может быть принята минимальная масса при покусковом отборе. При многокусковом отборе она может быть значительно больше опорной, а при снижении крупности кусков может быть значительно меньше опорной.*

Ключевые слова: *фундаментальная погрешность опробования; минимальная масса пробы.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gy. P. Sampling of particulate material: theory and practice. Elsevier: Amsterdam, 1979 and 1982, 431 p.
2. Holmes R. J. Challenges of developing ISO sampling standards. Fifth World Conference on Sampling & Blending. Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011. P. 57–63.
3. Esbensen K. H., Minkkinen P. Illustrating Sampling standards – how tu guaratee complete understanding and TOS – compliance? Fifth World Conference on Sampling & Blending, Conference Proceedings, Gecamin Ltda, 2011. P. 383–392.
4. Dihalu D. S., Geelhoed B. A. Critique of Gy's Sampling Theory. URL: http://vixra.org/abs/1203.0081

5. Richard Minnitt, Kim H. Esbensen. Pierre Gy's development of the Theory of Sampling: a retrospective summary with a didactic tutorial on quantitative Sampling of one – dimensional lots. URL: https//www.researchgate.net//publication/314234218

6. Geelhoed B. Approaches in Material Sampling, Delft University Press, 2010. 152 p.

7. Geelhoed B. Is Gy's Formula for the fundamental sampling error accurate? Experimental evidence // Minerals Engineering. 2011. No. 24(2). P. 169–173.

8. Dihalu D. S., Geelhoed B. A new multi-axial particle shape factor – application to particle sampling // Analist. 2011. No. 136(18). P. 3783–3788.

9. Козин В. З. Опробование минерального сырья. Екатеринбург: УГГУ, 2011. 315 с.

10. Козин В. З., Комлев А. С., Ступакова Е. В. Об использовании дубликатного опробования для оценки случайных погрешностей // Обогащение руд. 2019. № 6. С. 35–40.

11. Козин В. З., Комлев А. С. Определение коэффициентов вариации массовой доли компонентов в продуктах обогащения // Обогащение руд. 2019. № 1. С. 28–33.

12. Ляпин А. Г. Инженерно-аналитический контроль технологий добычи и переработки минерального сырья // Горный журнал. 2009. № 4. С. 14–16.

13. Морозов В. В., Столяров В. Ф., Коновалов А. М. Повышение эффективности управления флотацией с использованием поточных анализаторов состава пульпы // Обогащение руд. 2003. № 4. С. 33–36.

14. Зайцев В. А., Макарова Т. А., Барков А. В., Бахтияров А. В., Москвин Л. Н. Неразрушающий контроль состава полиметаллических руд и продуктов обогатительного цикла // Цветные металлы. 2006. № 8. С. 60–67.

Поступила в редакцию 10 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Козин Владимир Зиновьевич – доктор технических наук, профессор, декан горно-механического факультета Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.dek@ursmu.ru

Комлев Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tails2002@inbox.ru

Для цитирования: Козин В. З., Комлев А. С. Покусковой и многокусковой отбор точечных проб в теории опробования // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 54–61 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-54-61

For citation: Kozin V. Z., Komlev A. S. Independent particle and lot selection of increment samples in the theory of sampling. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 54–61. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-54-61

УДК 622.7 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69

Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией

Морозов Ю. П.[1]*, Пеньков П. М.[1], Дмитриев В. Т.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: gmf.opi@ursmu.ru

Реферат

Предмет и цель работы. *Центробежные сепараторы широко используются для извлечения золота в течение последних нескольких десятилетий. Основным недостатком способа является большой расход воды, необходимый во время работы, что в свою очередь сказывается на повышении капитальных и эксплуатационных затрат. Поскольку вода становится все более важным ресурсом, исследование центробежной сепарации с турбулизацией воздухом имеет большое практическое значение. Целью данной работы является исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией с использованием циркуляционной концентрации.*

Методология. *Предлагаемый способ центробежной сепарации реализован в лабораторных условиях на искусственной смеси кварца крупностью –0,1…+0,01 мм и порошка вольфрама крупностью –0,023…+0,02 мм. Центробежную сепарацию осуществляли в лабораторном турбулизационном сепараторе К-200ВЛ, оснащенном пневматическим турбулизатором для турбулизации пристеночного слоя подаваемыми изнутри конуса струями сжатого воздуха. По окончании каждого опыта определяли выход концентрата и хвостов, массовую долю в них вольфрама, рассчитывали извлечение вольфрама в концентрат.*

Выводы. *Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции. Центробежная сепарация с использованием циркуляционной концентрации позволяет увеличить извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию и повысить качество тяжелой фракции, а использование пневматической турбулизации ведет к снижению удельного расхода воды.*

Ключевые слова: *центробежная сепарация; замкнутый цикл; циркуляция; турбулизация воздухом; искусственная смесь.*

Введение. Одними из самых старых методов обогащения, основанных на разнице в плотности разделяемых минералов, являются гравитационные методы обогащения [1]. В настоящее время значительная часть металла в россыпях представлена мелким и тонким золотом, а в техногенных месторождениях в основном находится тонкое золото [2]. Применение центробежных аппаратов для обогащения минерального сырья связано с необходимостью более полного извлечения ценных компонентов из мелких и тонких классов крупности. Центробежные ускорения в десятки и сотни раз превышают ускорение свободного падения, что позволяет существенно снизить нижний предел крупности разделяемых минералов [3]. Гравитационные методы, применяемые для извлечения золота, основаны на разделении в центробежных потоках пульпы [4–9].

Гравитационные методы обогащения используются для разделения минералов различных размеров, форм и плотностей. Эти методы имеют преимущества по сравнению с другими методами разделения, такими как флотация и цианирование, которые являются дорогостоящими, загрязняющими окружающую среду и сложными в эксплуатации. Преимущества гравитационных методов включают в себя снижение капитальных и эксплуатационных затрат, а также меньшее за-

грязнение окружающей среды. Хотя гравитационные методы не могут полностью заменить некоторые процессы разделения, такие как флотация, они могут использоваться в качестве дополнения в технологических схемах. Гравитационное разделение имеет возможность извлечения тяжелых минералов, которые все еще остаются в хвостах флотации [10].

Центробежные сепараторы широко используются для извлечения золота в течение последних нескольких десятилетий [11]. Основным недостатком является большой расход воды, необходимый во время работы, что в свою очередь сказывается на повышении капитальных и эксплуатационных затрат [1,12]. Также в процессе работы центробежного сепаратора с легкой фракцией теряются частицы повышенной плотности. Это обусловлено вымыванием из конуса сепаратора частиц повышенной плотности, находящихся у поверхности пристеночного слоя [13].

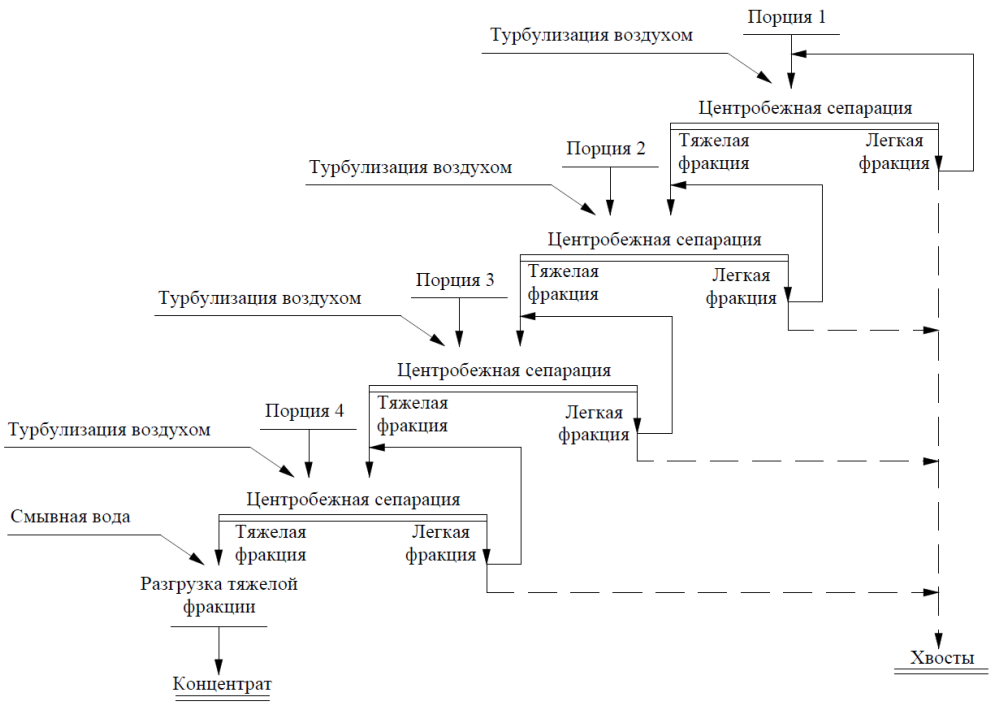


Рис. 1. Технологическая схема центробежной сепарации при переработке четырех порций исходного питания
Fig. 1. Flow diagram of centrifugal separation with four portions of feedstock

В связи с этим возникает необходимость повышения извлечения ценных компонентов в центробежной сепарации при использовании ее в схеме циркуляционной концентрации [14]. Поскольку вода становится все более важным ресурсом, исследование центробежной сепарации с турбулизацией воздухом имеет большое практическое значение [1].

Методология и результаты исследования. С целью повышения эффективности показателей центробежной сепарации разработана технология, совмещающая центробежную сепарацию и циркуляционную концентрацию. Она включает: последовательную подачу порций исходного материала в виде пульпы; центробежную сепарацию порций с турбулизацией пристеночного слоя конуса изнутри конуса струями сжатого воздуха и циркуляцией легкой фракции в течение заданного времени с последующим удалением ее в хвосты; единовременную разгрузку

тяжелой фракции в концентрат с помощью смывной воды после переработки заданного количества порций.

Схема проведения опытов по центробежной сепарации при переработке четырех порций исходного питания представлена на рис. 1.

Эксперименты выполнены следующим образом.

Путем перемешивания заданного количества исходного питания с водой готовится порция пульпы с заданной массовой долей твердого, которая подается в операцию центробежной сепарации. При подаче сжатого воздуха в пневматические турбулизаторы происходит турбулизация воздухом пристеночного слоя пульпы. Частицы повышенной плотности за счет центробежной силы продвигаются в пристеночном слое из движущейся по поверхности конуса пульпы к поверхности конуса и накапливаются в пазах конуса.

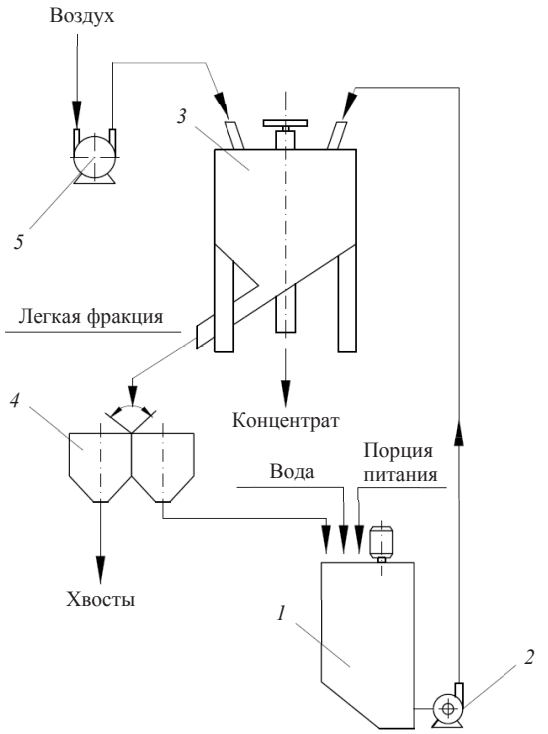


Рис. 2. Схема цепей аппаратов для реализации центробежной сепарации по предлагаемому способу:
1 – зумпф; *2* – насос; *3* – центробежный сепаратор; *4* – переключатель потоков; *5* – компрессор для подачи сжатого воздуха

Fig. 2. Machine flow sheet for centrifugal separation according tp the proposed method:
1 – sump; *2* – pump; *3* – centrifugal separator; *4* – flow switch; *5* – compressor for compressed air supply

Частицы повышенной плотности, которые не успели попасть в пазы конуса, выносятся в легкую фракцию, которая возвращается в центробежный сепаратор. Циркуляция осуществляется в течение времени, при котором обеспечивается максимальное извлечение частиц повышенной плотности в пазы конуса. Продолжительность циркуляции в каждом конкретном случае определяется экспериментально.

По истечении заданного времени циркуляции легкая фракция направляется в хвосты. Тяжелая фракция остается в пазах конуса центробежного сепаратора.

Далее последовательно, аналогично переработке первой порции, перерабатываются следующие порции исходного питания.

Предел количества перерабатываемых порций определяется значением массовой доли в пазах конуса частиц повышенной плотности, при котором происходит снижение извлечения этих частиц за счет увеличения их выноса в легкую фракцию. Для каждого исходного питания продолжительность циркуляции легкой фракции и количество перерабатываемых порций исходного питания определяются экспериментально.

По окончании переработки заданного количества порций исходного питания осуществляется разгрузка тяжелой фракции вымыванием из пазов конуса смывной водой в концентрат.

Таблица 1. Результаты центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции по известному и предлагаемому способам
Table 1. Results of centrifugal separation in the mode of light fraction circulation according to the existing method and the proposed method

Показатель, %	Количество циклов переработки порций исходного питания			
	1	2	3	4
По известному способу (с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя)				
Выход концентрата	22,54	22,65	22,60	22,59
Массовая доля вольфрама в концентрате	3,99	4,07	4,08	4,08
Извлечение вольфрама в концентрат	90,12	92,21	92,25	92,26
По предлагаемому способу (с пневматической турбулизацией пристеночного слоя)				
Выход концентрата	23,19	23,77	23,01	22,99
Массовая доля вольфрама в концентрате	3,86	3,93	4,25	4,25
Извлечение вольфрама в концентрат	89,58	93,47	97,74	97,22

Схема цепей аппаратов, реализующая центробежную сепарацию по предлагаемому способу, представлена на рис. 2.

Предлагаемый способ центробежной сепарации реализован в лабораторных условиях на искусственной смеси кварца крупностью –0,1…+0,01 мм и порошка вольфрама крупностью –0,023…+0,02 мм. Плотность кварца 2650 кг/м^3, плотность вольфрама 18 000 кг/м3.

Центробежную сепарацию осуществляли в лабораторном турбулизационном сепараторе К-200ВЛ 3, оснащенном пневматическим турбулизатором для турбулизации пристеночного слоя подаваемыми изнутри конуса струями сжатого воздуха.

В каждом опыте порции искусственной смеси массой 2000 г, содержащей 20 г вольфрама (1 %), в виде пульпы с массовой долей твердого 20 % подвергали центробежной сепарации при скорости вращения конуса 1100 мин$^{-1}$ и давлении воздуха в пневматическом турбулизаторе 0,5 МПа.

Насос обеспечивал прохождение порций пульпы объемом 8,3 л через центробежный сепаратор за 20 секунд.

В опытах с циркуляцией легкой фракции количество циклов центробежной сепарации на одной порции составляло 1; 2; 3; 4.

Эксперименты осуществлялись следующим образом. Порцию искусственной смеси массой 2000 г и воду подавали в зумпф *1* с мешалкой для получения пульпы с массовой долей твердого 20 %.

Далее запустили центробежный сепаратор *3* в работу, с помощью частотного преобразователя установили частоту вращения вала с конусом 1100 мин$^{-1}$, подали сжатый воздух в пневматический турбулизатор компрессором *5*. Давление воздуха в пневматическом турбулизаторе составляло 0,5 МПа. Затем из зумпфа *1* пульпу подавали насосом *2* в центробежный сепаратор *3* при переключателе потоков *4* в положение подачи легкой фракции центробежного сепаратора *3* в зумпф *1*.

При подаче пульпы из зумпфа *1* в центробежный сепаратор *3* она под действием центробежной силы движется по поверхности конуса к его широкой части. С помощью воздуха из пневматического турбулизатора происходит турбулизация пристеночного слоя пульпы на поверхности конуса. Частицы повышенной плотности за счет центробежной силы продвигаются в пристеночном слое движущейся по поверхности конуса пульпы к поверхности конуса и накапливаются в пазах конуса.

Таблица 2. Результаты центробежной сепарации при переработке заданного количества порций по известному и предлагаемому способам
Table 2. Results of centrifugal separation with the preset amount of portions processing according to the existing method and the proposed method

Показатель, %	Количество порций исходного питания			
	1	5	10	15
По известному способу (с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя)				
Выход концентрата	22,60	5,21	3,00	2,53
Массовая доля вольфрама в концентрате	4,08	17,70	29,58	32,47
Извлечение вольфрама в концентрат	92,21	92,24	88,75	82,15
По предлагаемому способу (с пневматической турбулизацией пристеночного слоя)				
Выход концентрата	23,01	5,29	3,08	2,60
Массовая доля вольфрама в концентрате	4,25	18,50	31,71	36,29
Извлечение вольфрама в концентрат	97,74	97,75	97,69	94,36

Частицы повышенной плотности, которые не успели попасть в пазы конуса, выносятся пульпой в легкую фракцию, которая через переключатель потоков *4*, зумпф *1* и насос *2* возвращается в центробежный сепаратор *3*.

По истечении заданного времени работы в замкнутом цикле переключатель потоков *4* направляет легкую фракцию в хвосты. После разгрузки легкой фракции в хвосты процесс осуществляли на следующих порциях исходного питания.

После переработки заданного количества порций прекратили подачу сжатого воздуха в пневматический турбулизатор и подали воду в водный турбулизатор при давлении 0,008 МПа, частоту вращения конуса с помощью частотного преобразователя установили 50 об/мин. Из пазов конуса водой из водных турбулизаторов вымывалась тяжелая фракция, которая самотеком направлялась в концентрат.

Выполнено сравнение показателей работы центробежного сепаратора при турбулизации пристеночного слоя воздухом (предлагаемый способ) и водой (известный способ).

По окончании каждого опыта определяли выход концентрата и хвостов, массовую долю в них вольфрама, рассчитывали извлечение вольфрама в концентрат. Результаты экспериментов по центробежной сепарации с циркуляцией легкой фракции по известному и предлагаемому способам приведены в табл. 1.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что совмещение циркуляции легкой фракции с пневматической турбулизацией пристеночного слоя обеспечивает более высокое извлечение в концентрат (97,7 %) по сравнению с совмещени-

ем циркуляции легкой фракции с гидравлической турбулизацией пристеночного слоя (92,2 %).

Далее проведены эксперименты центробежной сепарации при переработке заданного количества порций по известному и предлагаемому способам. Реализована центробежная сепарация при переработке 1, 5, 10 и 15 порций исходного питания до смыва накопленной тяжелой фракции из пазов конуса в концентрат. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

В целом установлено, что предлагаемый способ центробежной сепарации по сравнению с известным способом обеспечивает более высокие показатели по качеству концентрата и извлечению вольфрама в концентрат. При этом предлагаемый способ центробежной сепарации реализован на материале с тонкими частицами повышенной плотности крупностью –0,023…+0,01 мм. Частицы такой крупности в известных центробежных сепараторах извлекаются неэффективно.

Анализ и обсуждение результатов. Сочетание турбулизации пристеночного слоя конуса центробежного сепаратора струями сжатого воздуха с циркуляцией легкой фракции обеспечивает высокое извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию, а последовательная переработка заданного количества порций в режиме турбулизации пристеночного слоя конуса струями сжатого воздуха позволяет перерабатывать большее количество порций без потерь частиц повышенной плотности с легкой фракцией и получать за счет этого более высокое качество концентрата. Также применение пневматической турбулизации способствует сокращению используемой в процессе центробежной сепарации воды.

Вывод. Полученные данные свидетельствуют о высокой эффективности центробежной сепарации в режиме циркуляции легкой фракции. Центробежная сепарация с использованием циркуляционной концентрации позволяет увеличить извлечение частиц повышенной плотности в тяжелую фракцию и повысить качество тяжелой фракции, а использование пневматической турбулизации ведет к снижению удельного расхода воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters. Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2016. Vol. 91. P. 42–54.

2. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67.

3. Чинова Н. Б. Повышение эффективности извлечения золота из труднообогатимых руд // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых: матер. 9 Междунар. науч. школы молодых ученых и специалистов. 19–23 ноября 2012 г. М.: ИПКОН РАН, 2012. С. 402–406.

4. Морозов Ю. П. Теоретическое обоснование и разработка новых методов и аппаратов извлечения мелкодисперсных благородных металлов из руд техногенного сырья: дис. … д-ра техн. наук. Екатеринбург, 2001. 397 с.

5. Лопатин А. Г. Центробежное обогащение руд и песков. М.: Недра, 1987. 222 с.

6. Полькин С. И. Обогащение руд и россыпей редких и благородных металлов. М.: Недра, 1987. 428 с.

7. Зеленов В. И., Щендригин А. Н. Пути совершенствования технологии переработки золото- и серебросодержащих руд. М.: ВИЭМС, 1986. 40 с.

8. Кизевальтер Б. В. Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 295 с.

9. Багазеев В. К. Разработка россыпных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 6. С. 122–136.

10. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling // Minerals Engineering. 2017. Vol. 112. P. 57–67.

11. Морозов Ю. П. Анализ гравитационного разделения минералов в стесненных условиях движения // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 4. С. 93–98.

12. Ozan Kökkılıç, Ray Langlois, Kristian E. Waters. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator // Minerals Engineering. 2015. Vol. 72. P. 73–86.

13. Пеньков П. М., Хамидулин И. Х. Исследования работы центробежного сепаратора при циркуляции легкой фракции // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXII Междунар. науч.-техн. конф. 19–20 апреля 2017 г. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. С. 148–150.

14. Хамидулин И. Х. Технологии извлечения золота с использованием циркуляционной концентрации: дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 125 с.

Поступила в редакцию 17 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Морозов Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru
Пеньков Павел Михайлович – аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: paha_opi@mail.ru
Дмитриев Владимир Трофимович – доктор технических наук, профессор кафедры эксплуатации горного оборудования Уральского государственного горного университета. E-mail: gmf.ego@m.ursmu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69

Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization

Iurii P. Morozov[1], Pavel M. Penkov[1], Vladimir T. Dmitriev[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract
Research aim and subject. *In the last few decades centrifugal separators have been widely used to extract gold. Large water consumption essential in the course of operation is the basic drawback of the method, which in its turn results in increased capital and operational expenditure. As soon as water is becoming increasingly more important resource, the study of centrifugal separation with air turbulization is of great practical significance. The aim of the present research is to study the method of improving technological parameters of centrifugal separation with the use of circulation concentration.*
Methodology. *The proposed method of centrifugal separation has been realized in laboratory conditions at artificial quartz with grain size range of 0.1…+0.01 mm and tungsten powder with grain size range of 0.023…+0.02. Centrifugal separation has been carried out in a laboratory turbulization separator K-200VL equipped with a pneumatic mixing baffle for near-wall layer turbulization with compressed air streams delivered from inside the cone. On completion of each test, concentrate and tailings output has been determined as well as the mass fraction of tungsten within them; tungsten extraction to concentrate has been calculated.*
Summary. *The obtained data prove high effectiveness of centrifugal separation in the mode of light fraction circulation. Centrifugal separation with the use of circulation concentration makes it possible to increase extraction of high-density particles to heavy fraction and increase the quality of heavy fraction, while the use of pneumatic turbulization leads to specific water consumption reduction.*

Key words: *centrifugal separation; closed cycle; circulation; air turbulization; artificial mixture.*

REFERENCES

1. Meng Zhou, Ozan Kökkılıç, Raymond Langlois, Kristian E. Waters. Size-by-size analysis of dry gravity separation using a 3-in. Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2016; 91: 42–54.
2. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017; 112: 57–67.
3. Chinova N. B. Improving the effectiveness of gold extraction from complex ore. In: *Young scientists' impression of the problems of mineral resources exploitation in the 21st century: proceedings of the 9th International Scientific Training of Young Scientists of Experts, 19−23 November 2012*. Moscow: IPKON RAN Publishing; 2012. p. 402−406. (In Russ.)
4. Morozov Iu. P. *Theoretic rationale and development of new methods and devices of finely dispersed precious metals extraction from the ore of technogenic raw material. DSc in Engineering diss*. Ekaterinburg; 2001. (In Russ.)
5. Lopatin A. G. *Centrifugal concentration of ore and sand*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
6. Polkin S. I. *Concentration of ore and rare and precious placer metals*. Moscow: Nedra Publishing; 1987. (In Russ.)
7. Zelenov V. I., Shchendrigin A. N. *Ways of improving the technology of processing gold and silver-bearing ore*. Moscow: VIEMS Publishing; 1986. (In Russ.)
8. Kizevalter B. V. *Theoretical fundamentals of gravity processes of concentration*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
9. Bagazeev V. K. Places mine development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 1994; 6: 122–136. (In Russ.)

10. Ali Ghaffari, Akbar Farzanegan. An investigation on laboratory Knelson Concentrator separation performance: Part 1: Retained mass modeling. *Minerals Engineering*. 2017; 112: 57–67.

11. Morozov Iu. P. Analysis of mineral gravity separation in constraint environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011; 4: 93–98. (In Russ.)

12. Ozan Kökkılıç, Ray Langlois, Kristian E. Waters. A design of experiments investigation into dry separation using a Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*. 2015; 72: 73–86.

13. Penkov P. M., Khamidulin I. Kh. Study of centrifugal separator operation under light fraction separation. In: *Scientific fundamentals and practice of ore and technogenic raw material processing: proceedings of the 22nd International sci.-pract. conf., 19–20 April 2017*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2017. p. 148–150. (In Russ.)

14. Khamidulin I. Kh. *Technologies of gold extraction with the use of circulation concentration: PhD in Engineering diss*. Ekaterinburg; 2017. (In Russ.)

Received 17 March 2020

Information about authors:

Iurii P. Morozov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: gmf.opi@ursmu.ru
Pavel M. Penkov – PhD student, Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: paha_opi@mail.ru
Vladimir T. Dmitriev – DSc (Engineering), professor of Mining Equipment Exploitation Department, the Ural State Mining University. E-mail: gmf.ego@m.ursmu.ru

Для цитирования: Морозов Ю. П., Пеньков П. М., Дмитриев В. Т. Исследование способа повышения технологических показателей центробежной сепарации с пневматической турбулизацией // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 62–69. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69
For citation: Morozov Iu. P., Penkov P. M., Dmitriev V. T. Investigating the method of improving technological parameters of centrifugal separation with pneumatic turbulization. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 62–69 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-62-69

УДК 661. 882.022 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-70-79

Технологические исследования на обогатимость полиметаллической руды месторождения Хандиза

Умарова И. К.[1]*, Аминжанова С. И.[1], Салижанова Г. К.[1], Каландаров К. С.[1]
[1] Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент, Узбекистан
e-mail: o_hayitov@mail.ru

Реферат

Введение. *В статье рассматриваются результаты технологических исследований на обогатимость полиметаллической руды месторождения Хандиза. Представлены результаты исследования вещественного состава и варианты флотационного обогащения технологических проб руды месторождения Хандиза.*

Цель работы. *Целью данной работы является изучение вещественного состава проб руды и разработка эффективной технологии обогащения полиметаллической руды месторождения Хандиза.*

Методология. *В качестве объекта исследования выбрана полиметаллическая руда месторождения Хандиза. При выполнении данной работы использованы различные реагенты и лабораторные установки, современные физические, физико-химические и химические методы анализов. Исследования проводились по двум направлениям: коллективная флотация всех рудных минералов с дальнейшей селекцией коллективного концентрата на свинцовый, цинковый и медный концентраты и прямая коллективно-селективная флотация с получением последовательно свинцово-медного и цинкового концентратов.*

Результаты. *Приведены итоги изучения вещественного состава руды на основе спектрального, химического и рационального анализа. Установлено, что промышленно ценными компонентами руды являются свинец, цинк и медь, содержания которых приводятся. Показано, что рудные минералы находятся в тесном срастании с нерудными – кварцем, серицитом, хлоритом, карбонатом и др.*

Выводы. *В результате обогащения выделены свинцовый, цинковый и медный концентраты, удовлетворяющие требованиям производства.*

Ключевые слова: *коллективная флотация; селективная флотация; ксантогенат; депрессор; активатор; полиметаллические руды; десорбция; реагент; концентрат; хвосты; промпродукт.*

Введение. Значительный рост производства металлов, комплексное использование сырья, вовлечение в процесс промышленного производства новых типов руд, снижение себестоимости переработки, повышение извлечения металлов из руд являются важнейшими и актуальными задачами в развитии эффективности и освоения минерально-сырьевых богатств недр Узбекистана [1].

Цель работы. Целью данной работы является изучение вещественного состава проб руды и разработка эффективной технологии обогащения полиметаллической руды месторождения Хандиза.

Методология. В качестве объекта исследования выбрана полиметаллическая руда месторождения Хандиза. При выполнении данной работы использованы различные реагенты и лабораторные установки, современные физические, физико-химические и химические методы анализов.

Результаты исследования. С целью изучения вещественного состава руды отбирались усредненные пробы для выполнения спектрального, химического, рационального анализов, а также образцы и средние пробы руды крупностью 3–0 мм для минералогического исследования и гранулометрического анализа [2].

Результаты полуколичественного спектрального анализа пробы руды приведены в табл. 1.

Результаты химического анализа средней пробы помещены в табл. 2. Удельный вес пробы 2,88 г/см^3.

Таблица 1. Результаты полуколичественного спектрального анализа пробы руды
Table 1. Results of semi-quantitative spectral analysis of ore samples

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
Кремний	Более 1	Медь	0,3
Алюминий	Более 1	Свинец	Более 1
Магний	0,3	Серебро	0,003
Кальций	0,1	Сурьма	0,01
Железо	Более 1	Цинк	Более 1
Марганец	0,01	Кадмий	0,01
Никель	0,001	Галлий	0,001
Титан	0,03	Бериллий	0,001
Ванадий	0,001	Стронций	0,01
Молибден	Менее 0,001	Барий	0,03
Цирконий	0,003		

По результатам химического анализа содержание полезных компонентов в пробе составляет: свинца – 2,54 %, цинка – 5,12 %, меди – 0,6 %.

Для выяснения распределения основных ценных компонентов по классам крупности исходная проба руды крупностью –3+0 мм подвергалась ситовому анализу. Результаты ситового анализа проб руды приведены в табл. 3.

Таблица 2. Результаты химического анализа средней пробы руды
Table 2. Results of chemical analysis of ore average sample

Компонент	Содержание, %	Компонент	Содержание, %
Кремнезем	71,80	Свинец	2,54
Оксид железа (3+)	3,00	Цинк	5,12
Оксид железа (2+)	1,80	Медь	0,60
Оксид титана	0,10	Оксид углеводорода	–
Оксид марганца	0,01	$-H_2O_{гигр}$	0,80
Глинозем	5,20	Сера общая	6,00
Оксид кальция	0,20	Оксид серы (6+)	–
Оксид магния	–	Золото, у. е.	0,00
Оксид калия	0,15	Серебро, у. е.	40,00
Оксид натрия	0,08		

Как следует из табл. 3, содержание свинца, цинка и меди в мелких классах повышается до 4,14; 4,96 и 1,47 % соответственно. Результаты рационального анализа руды приведены в табл. 4. Как видно из данных, приведенных в табл. 4, 78,7 % свинца, 78,8 % цинка и 98,4 % меди находятся в сульфидной форме; 14,5 % свинца, 11,0 % цинка – в оксидной форме.

В результате проведенного минералогического анализа установлено, что полиметаллическая руда представлена обломками микрокварцитов в различной степени окварцованных, серицитизированных и хлоритизированных.

Основными рудными минералами являются сфалерит, галенит, халькопирит и пирит. Главными нерудными минералами в руде являются кварц, серицит и хлорит. Сплошные массивные руды сложены взаимно тесно проросшими между собой тонкозернистыми сфалеритом, галенитом и халькопиритом [3].

Таблица 3. Гранулометрическая характеристика пробы руды
Table 3. Granulometric characteristic of ore sample

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание, %				Распределение, %		
		Pb	Zn	Cu	S	Pb	Zn	Cu
–3+2,5	9,9	1,98	4,40	0,49	2,06	7,8	8,8	8,2
–3+1	54,0	2,72	4,80	0,53	1,84	59,0	52,7	49,2
–1+0,5	14,2	1,76	5,87	0,53	1,98	10,0	16,8	12,8
–0,5+0,25	7,4	2,27	4,60	0,61	2,47	6,7	6,9	7,7
–0,25+0,15	3,8	2,69	4,56	0,61	2,71	3,8	4,1	3,5
–0,15+0,1	2,8	2,38	5,04	0,73	3,25	2,8	2,7	2,9
–0,1+0,074	2,3	2,49	5,36	0,82	3,58	2,3	2,3	2,5
–0,074+0,044	3,0	4,14	6,96	1,47	6,34	3,0	5,0	4,2
–0,044+0,0	2,0	2,99	4,94	0,90	1,06	2,0	2,1	1,1
Руда	100,0	2,49	5,10	0,58	2,17	100,0	100,0	100,0

Изучаемая проба руды характеризуется простым комплексом слагающих ее минералов, но отличается сложным, чрезвычайно тонким и тесным взаимным прорастанием минералов между собой, что представляет большое затруднение при их разделении.

Таблица 4. Результаты рационального анализа средней пробы руды
Table 4. Results of rational analysis of ore average sample

Соединения	Содержание, %	Распределение, %
Свинец общий	2,54	100,0
в виде сульфидов	1,73	78,7
в виде оксидов	0,32	14,5
остаток	0,15	6,8
Цинк общий	5,12	100,0
в виде сульфидов	4,14	78,8
в виде оксидов	0,58	11,0
остаток	0,64	12,2
Медь общая	0,62	100,0
сульфидная	0,61	98,4
связанная	0,01	1,6

Результаты. Исследования проводились по двум направлениям: коллективная флотация всех рудных минералов с дальнейшей селекцией коллективного концентрата на свинцовый, цинковый, медный и пиритный концентраты и прямая коллективно-селективная флотация с получением последовательно свинцово-медного, цинкового и пиритного концентратов [3–10].

Первый путь предопределен тем, что раскрытие зерен нерудных минералов происходит раньше [11, 12]. В качестве реагентов использовались: *собиратели* –

бутиловый ксантогенат, бутиловый аэрофлот; *вспениватели* – ИМ-68, Т-92, крезол; *регуляторы среды* – сода кальцинированная, жидкое стекло, цинковый купорос, цианистый натрий; *активаторы* – медный купорос, сернистый натрий, активированный уголь, сульфоуголь и др.

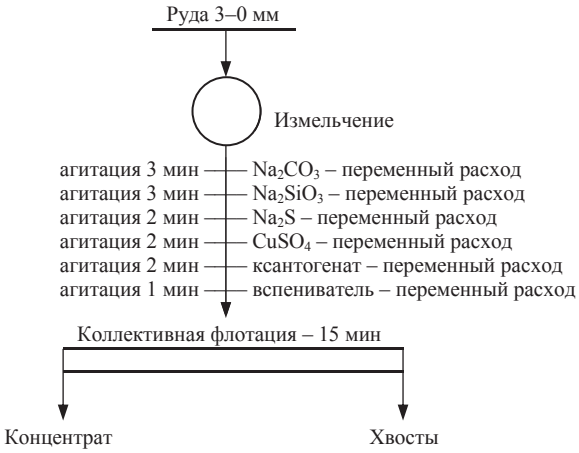


Рис. 1. Технологическая схема опытов коллективной флотации руды
Fig.1. Flow diagram of ore bulk flotation tests

Водорастворимые реагенты подавались в пульпу в виде растворов 1–10-процентной концентрации, вспениватели – в виде капель, уголь (активированный и сульфоуголь) – в сухом измельченном виде.

Технологическая схема опытов коллективной флотации приведена на рис. 1.

Таблица 5. Результаты опытов флотации с двумя перечистками концентрата в оптимальном режиме

Table 5. Results of flotation test with two rewash concentrates in an optimum mode

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Коллективный концентрат	15,5	18,15	30,12	2,85	85,9	91,2	74,6
Промпродукт 1	6,8	0,69	1,14	0,29	1,4	1,5	3,3
Промпродукт 2	2,7	3,52	5,98	0,38	2,9	3,2	1,7
Хвосты	75,0	0,44	0,28	0,16	10,1	4,1	20,4
Руда	100,0	2,48	5,10	0,59	100,0	100,0	100,0

На основании проведенных опытов в качестве оптимального выбран следующий режим.

Оптимальный режим коллективной флотации

Измельчение, мин 90
Крупность –0,074 мм, % 89
Расход реагентов:
Сода, г/т 750
Na_2S, г/т 190
Жидкое стекло, г/т 200
Медный купорос, г/т 240
Бутилксантогенат, г/т 125
Вспениватель Т-92, г/т 60

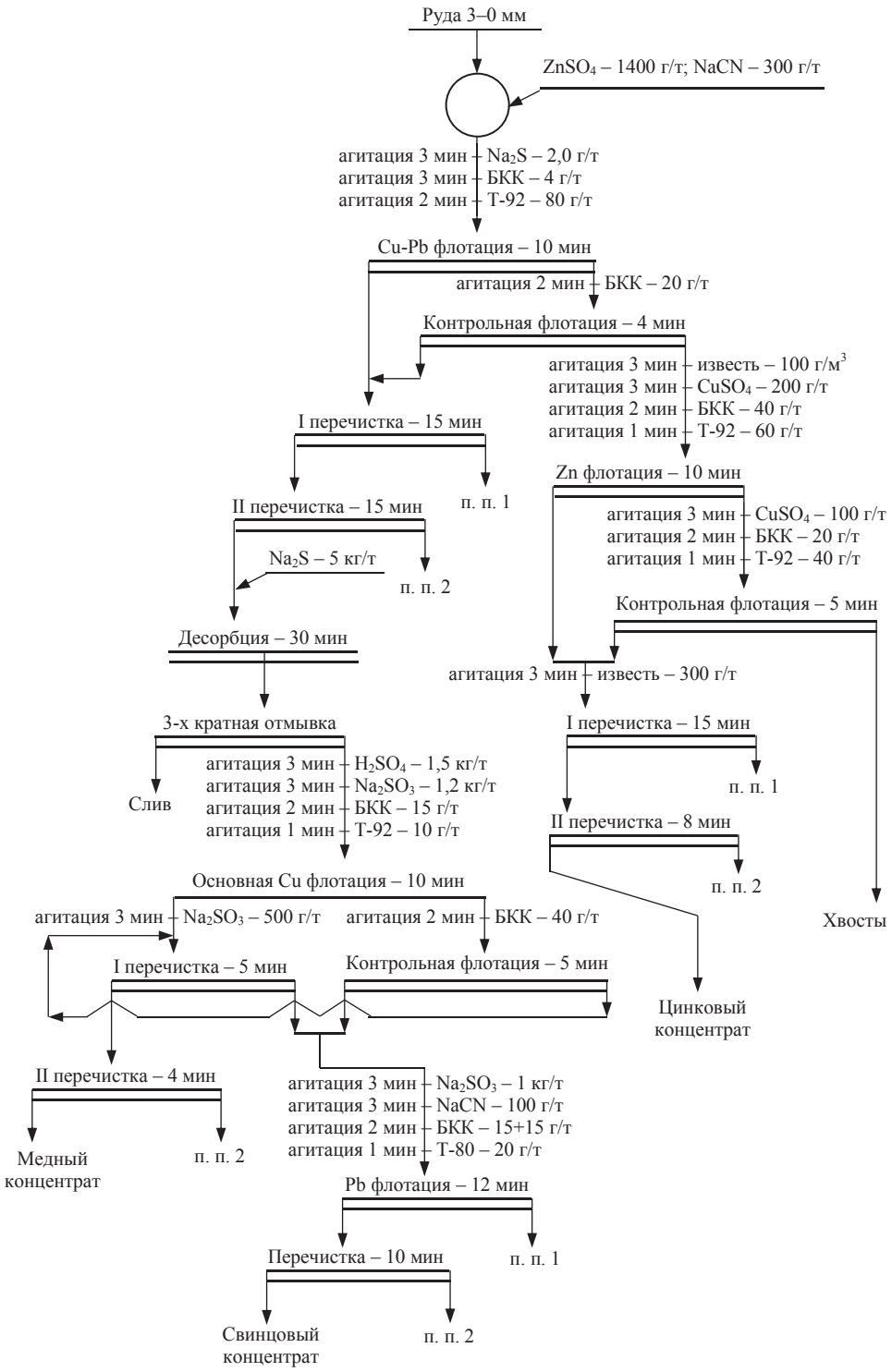


Рис. 2. Схема коллективно-селективной флотации руды
Fig. 2. Scheme of bulk-selective flotation of ore

При выбранном режиме наблюдается сравнительно высокое извлечение всех компонентов в коллективный концентрат свинца, цинка и меди и довольно низкий по содержанию в хвостах.

В условиях оптимального режима был поставлен опыт с перечистками коллективного концентрата с целью повышения качества продукта [6]. Результаты опыта приведены в табл. 5. Как видно из табл. 5, в результате двух перечисток повышается содержание всех компонентов в концентрате.

Таблица 6. Результаты опыта селекции коллективного концентрата
Table 6. Results of bulk concentrate selection test

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Концентрат Pb-Cu	10,2	20,73	20,70	4,20	64,5	42,0	77,4
Промпродукт 1	9,2	0,80	1,62	0,09	2,2	3,0	1,4
Промпродукт 2	4,5	1,20	1,74	0,20	1,6	1,6	1,6
Хвосты 1 (коллективные)	69,0	0,16	0,21	0,04	3,3	2,9	5,1
Хвосты 2	7,1	13,20	36,10	1,12	28,4	50,5	14,5
Руда	100,0	2,46	5,03	0,58	100,0	100,0	100,0

Условия опыта селекции: сернистый натрий – 6 кг/т; процент твердого – 50; число отмывок – 2; сода – 1000 г/т; NaCN – 2000 г/т; $ZnSO_4$ – 4800 г/т; БКК – 50 г/т; доизмельчение – 60 мин; время флотации – 10 мин; вспениватель – 40 г/т.

Дальнейшие исследования велись в направлении селекции коллективного концентрата. При этом вначале выделялся свинцово-медный, затем цинковый концентрат.

В качестве депрессоров цинковых минералов использовались комплексы: цианистый натрий, сернистокислый натрий и цинковый купорос, гидросульфит натрия и цинковый купорос. Наилучшая депрессия цинковых минералов достигнута с помощью цианистого натрия и цинкового купороса.

Таблица 7. Результаты опытов медной флотации с перечистками медного концентрата
Table 7. Results of copper flotation with copper concentrate rewash

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Концентрат Cu	1,7	8,06	3,12	23,68	5,4	1,0	71,7
Промпродукт-1 Cu	1,4	20,56	8,00	0,36	11,3	2,1	0,9
Промпродукт-2 Cu	1,5	17,28	6,57	0,51	10,2	1,9	1,3
Хвосты Cu флотации	3,8	43,23	11,50	0,15	64,4	8,5	1,7
Концентрат Pb-Cu	8,4	27,70	8,34	5,06	90,9	13,5	75,6

Схема селективной флотации включала в себя предварительное измельчение руды и коллективную флотацию в оптимальном режиме, две перечистки с последующим сгущением. Сгущенный продукт подвергался доизмельчению и десорбции. Десорбция осуществлялась путем перемешивания коллективного концентрата с сернистым натрием и последующей отмывкой (рис. 2). В табл. 6 приведены результаты опыта разделения коллективного концентрата и реагентный режим селекции.

Известно, что по мере загрузки в пульпу избыточного количества сернистого натрия и последующего его окисления флотируемость сульфидных минералов в пульпе восстанавливается с различной скоростью. Остаточная концентрация сульфид-ионов, при которой происходит флотация различных минералов, неодинакова.

Из табл. 6 следует, что селекция коллективного концентрата протекает неэффективно. Часть цинка переходит в свинцово-медный концентрат, что объясняется тесным взаимным прорастанием сфалерита с галенитом и халькопиритом и активацией сфалерита ионами меди [6].

Таблица 8. Результаты опыта свинцовой флотации из хвостов медной флотации
Table 8. Results of lead flotation from copper flotation tailings

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Концентрат Pb	3,0	50,60	11,22	0,26	59,7	6,5	1,4
Промпродукт Pb	0,8	15,65	12,95	0,21	4,9	2,0	0,3
Хвосты Cu флотации	3,8	43,23	11,50	0,25	64,6	8,5	1,7

При отмывке минералов, обработанных сернистым натрием, разными количествами воды наибольшая адсорбция ксантогената наблюдается на поверхности галенита. Различное поведение минералов при флотации в присутствии сернистого натрия обусловлено также его активирующим воздействием на флотацию галенита и пирита, различием в количестве адсорбирующегося сульфид-иона на поверхности различных сульфидов и т. д.

Таблица 9. Результаты опыта цинковой флотации при оптимальном расходе извести
Table 9. Results of zinc flotation under optimum lime consumption

Продукт	Выход, %	Содержание, %			Извлечение, %		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Концентрат Zn	13,6	0,63	29,07	0,74	3,4	76,2	17,9
Хвосты флотации	70,7	0,08	0,11	0,12	2,2	1,5	1,9
Хвосты Pb-Cu флотации	84,3	0,17	4,79	0,13	5,6	77,7	19,8

Для разделения свинцово-медного концентрата было испытано несколько вариантов схем и реагентных режимов. Общим для них являлось стремление к десорбции ксантогената с поверхности свинцовых и медных минералов [8]. Флотацию медных минералов проводили в кислой среде (pH около 3). Серная кислота необходима по двум причинам: во-первых, в сильно кислой среде ксантогенат достаточно интенсивно разрушается; во-вторых, серная кислота убирает из раствора избыток сернистого натрия, не успевшего окислиться либо отмыться, поэтому во избежание образования сероводорода необходимо тщательно проводить операцию отмывки.

Установлено, что ксантогенат с поверхности халькопирита не десорбируется сульфитом натрия. При воздействии различных концентраций сульфита на поверхности галенита остается определенное количество собирателя ($5 \cdot 101^{-5}$мг/см^2). Флотируемость халькопирита в присутствии сульфит-ионов максимальна при pH = 3.

На основании сказанного, а также многочисленных опытов по уточнению режима медной флотации пробы были выбраны оптимальный расход реагентов и условия флотации халькопирита.

В табл. 7 приведены результаты опыта медной флотации пробы в выбранном режиме.

Из хвостов медной флотации извлекались свинцовые минералы. Свинцовая флотация велась с одной перечисткой пенного продукта (табл. 8).

В цикле цинковой флотации при подборе режима варьировались расходы ксантогената и медного купороса [7–9]. Для подавления пирита использовали известь (табл. 9).

На основании данных табл. 9 можно сказать, что в выбранном режиме разделение свинцово-медного концентрата проб руды проходит удовлетворительно.

Выводы. Таким образом, выполнены технологические исследования полиметаллических проб руды месторождения Хандиза. Содержание полезных компонентов в пробе: свинца – 2,54 %, цинка – 5,12 %, меди – 0,6 %.

Лабораторные испытания проводились по двум направлениям: коллективная флотация всех сульфидов с последующим их разделением; коллективно-селективная флотация с последующим получением отдельных концентратов.

В результате обогащения выделены свинцовый, цинковый и медный концентраты, содержащие соответственно 50,6 % свинца, 29,07 % цинка и 23,68 % меди при извлечении их в одноименные концентраты 59,7; 76,2 и 71,7 % соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедов Н. А. Современные методы переработки руд и концентратов. Проблемы переработки минерального сырья Узбекистана // Матер. республ. науч.-технич. семинара. Ташкент, 2005. С. 7–10.

2. Умарова И. К., Иномов У. А. Изучение вещественного состава свинцово-цинковых руд // Техника юлдузлари. 2012. № 2. С. 68–72.

3. Шишкин А. А., Бурохлия М. С. Освоение комбинированной схемы обогащения свинцово-цинковых руд // Цветные металлы. 1983. № 7. С. 150–152.

4. Тусупбаев Н. К., Бектурганов Н. С., Турысбеков Д. К., Семушкина Л. В., Муханова А. А. Усовершенствование технологии селекции коллективного медно-свинцово-цинкового концентрата // Обогащение руд. 2013. № 8. С. 12–17.

5. Шумская Е. Н., Поперечникова О. Ю. Особенности технологии переработки полиметаллических руд // Горный журнал. 2016. № 11. С. 39–42.

6. Ran J. C., Liu Q. J., Zhang Z. G. Experiment research of a certain Cu-Pb-Zn polymetallic sulfide ore in Yunnan // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 556–562. P. 197–200.

7. Кирбитова Н. В., Елисеев Н. И., Кальнишевская Л. Н. Особенности активации сфалерита в растворе медного купороса // Известия вузов. Цветная металлургия. 1987. № 1. С. 12–16.

8. Finkelstein M. P., Allison S. A. The chemistry of activation, deactivation and depression of the flotation of zinc sulfide // A review in: Flotation, A. M. Gaudin memorial volume. New York, AIMMPE, 1976. Vol. 1. P. 414–457.

9. Lerox M., Rao S. R., Finch I. A. Selektive flotation of sphalerite from Pb-Zn ore without copper activation // GIM Bull. 1987. Vol. 80. No. 902. P. 41–44.

10. Умарова И. К. Технологические исследования на обогатимость полиметаллических проб руды месторождения Чинарсай // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности: матер. 12-й междунар. конф. Тула–Минск–Донецк, 2016. С. 332–338.

11. Umarova I. K., Salijanova G. Q., Avinjanova S. I. Study on the enrichment of polymetallic ores of the deposit Handiza // Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph. Universitas Publishing. Petroșani, Romania, 2018. P. 286–306.

12. Umarova I. K., Aminjanova S. I. Studying the material composition of the ore of deposit Handiza // International scientific and technical internet conference “Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing”. Petroșani, Romania, 2018. December 14. P. 175–178.

Поступила в редакцию 18 ноября 2019 года

Сведения об авторах:

Умарова Иноят Каримовна – кандидат химических наук, доцент кафедры горного дела Ташкентского государственного технического университета. E-mail: i.umarova.tdtu@mail.ru

Аминжанова Севара Исламовна – старший преподаватель кафедры горного дела Ташкентского государственного технического университета. E-mail: s.aminjanova.tdtu@mail.ru

Салижанова Гулнарахон Кахаровна – доцент кафедры горного дела Ташкентского государственного технического университета. E-mail: g.salijonova.tdtu@mail.ru

Каландаров Кобил Суярович – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела Ташкентского государственного технического университета. E-mail: q.qalandarov.tdtu@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-70-79

Khandiza polymetallic ore washability study

Inoiat K. Umarova[1], Sevara I. Aminzhanova[1], Gulnarakhon K. Salizhanova[1], Kobil S. Kalandarov[1]
[1] Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan.

Abstract

Introduction. *The article considers the results of operations research on the washability of polymetallic ore at Khandiza deposit. The results of the research of material composition are delivered together with the variants of process samples flotation at Khandiza deposit.*

Research aim *is to study the material composition of ore samples and the development of effective technology of polymetallic ore concentration at Khandiza deposit.*

Methodology. *Polymetallic ore of Khandiza deposit has been chosen as research subject. As part of the process various reagents have been used as well as various laboratory facilities, modern physical, physical-chemical and chemical methods of analysis. Research has been carried out in two direction: bulk flotation of all ore minerals with further selection of bulk concentrate to lead, zinc and copper concentrates and direct bulk selective flotation with the production of lead-copper and zinc concentrates in a successive order.*

Results. *The outcomes of ore material composition study have been delivered based on spectral, chemical and rational analysis. It has been determined that industrially valuable ore components are lead, zinc and copper, the contents of which are presented. It has been shown that ore minerals are in tight twinning with nonmetallic minerals, i.e. quartz, sericite, chlorite, carbonate, etc.*

Summary. *As a result of concentration, lead, zinc and copper concentrates have been dressed. The concentrated meet industrial requirements.*

Key words: *bulk flotation; selective flotation; xanthate; depressor; activating agent;* polymetallic ore; desorption; reagent; concentrate; tailings; middlings.

REFERENCES

1. Akhmedov N. A. Modern methods of ore and concentrates processing. Problems of Uzbekistan mineral raw material processing. In: *Proceedings of republican sci-tech seminar*. Tashkent; 2005. p. 7–10. (In Russ.)

2. Umarova I. K., Inomov U. A. Studying the material composition of lead-zinc ore. *Texnika yulduzlari*. 2012; 2: 68–72. (In Russ.)

3. Shishkin A. A., Burokhliia M. S. Developing the integrated scheme of concentrating lead-zinc ore. *Tsvetnye metally = Non-ferrous Metals*. 1983; 7: 150–152. (In Russ.)

4. Tusupbaev N. K., Bekturganov N. S., Turysbekov D. K., Semushkina L. V., Mukhanova A. A. Improving the technology of selecting bulk copper-lead-zinc concentrate. *Obogashchenie Rud = Mineral Processing*. 2013; 8: 12–17. (In Russ.)

5. Shumskaia E. N., Poperechnikova O. Iu. Features of polymetallic ore processing technology. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2016; 11: 39–42. (In Russ.)

6. Ran J. C., Liu Q. J., Zhang Z. G. Experiment research of a certain Cu-Pb-Zn polymetallic sulfide ore in Yunnan. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 556–562: 197–200.

7. Kirbitova N. V., Eliseev N. I., Kalnishevskaia L. N. Aspects of sphalerite activation in blue copper solution. *Izvestiia vuzov. Tsvetnaia metallurgiia = Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy*. 1987; 1: 12–16. (In Russ.)

8. Finkelstein M. P., Allison S. A. *The chemistry of activation, deactivation and depression of the flotation of zinc sulfide. A review in: Flotation, A. M. Gaudin memorial volume*. New York, AIMMPE, 1976. Vol. 1. P. 414–457.

9. Lerox M., Rao S. R., Finch I. A. Selective flotation of sphalerite from Pb-Zn ore without copper activation. *GIM Bull*. 1987; 80 (902): 41–44.

10. Umarova I. K. Operations research on the washability of polymetallic samples of ore at Chinarsai deposit. In: *Social-economic and ecological problems of mining industry: proceedings of 12th international conf*. Tula-Minks-Donetsk; 2016. p. 332–338.

11. Umarova I. K., Salijanova G. Q., Avinjanova S. I. Study on the enrichment of polymetallic ores of the deposit Handiza. *Sustainable development of resource-saving technologies in mineral mining and processing. Multi-authored monograph*. Universitas Publishing. Petroșani, Romania, 2018. P. 286–306.

12. Umarova I. K., Aminjanova S. I. Studying the material composition of the ore of deposit Handiza. *International scientific and technical internet conference "Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing"*. Petroșani, Romania, 2018. December 14. P. 175–178.

Received 18 November 2019

Information about authors:

Inoiat K. Umarova – PhD (Chemistry), associate professor, Mining Department, Tashkent State Technical University. E-mail: i.umarova.tdtu@mail.ru

Sevara I. Aminzhanova – senior lecturer, Mining Department,Tashkent State Technical University. E-mail: s.aminjanova.tdtu@mail.ru
Gulnarakhon K. Salizhanova – associate professor, Mining Department,Tashkent State Technical University. E-mail: g.salijonova.tdtu@mail.ru
Kobil S. Kalandarov – PhD (Engineering), associate professor, Mining Department,Tashkent State Technical University. E-mail: q.qalandarov.tdtu@mail.ru

Для цитирования: Умарова И. К., Аминжанова С. И., Салижанова Г. К., Каландаров К. С. Технологические исследования на обогатимость полиметаллической руды месторождения Хандиза // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 70–79. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-70-79
For citation: Umarova I. K., Aminzhanova S. I., Salizhanova G. K., Kalandarov K. S. Khandiza polymetallic ore washability study. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 70–79 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-70-79

УДК 504.06:622 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-80-89

Assessment of socio-eco-economic effectiveness of circular business models in mineral production

Liudmila A. Mochalova[1]*, Olga G. Sokolova[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia
e-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru

Abstract

Introduction. *According to Russian state reports on the environment, mining sector in Russia accounts for a significant amount of environmental impact.*

Research aim *is to substantiate a methodological approach to assessing the effectiveness of using environmentally friendly circular business models in mining enterprises.*

Research methodology *includes the study, critical assessment and systematization of the methods of environmental circular activity results determination in mineral production.*

Research results. *The effectiveness of circular business models is considered as a condition for their application. It consists of ecological, socio-ecological and eco-economic effectiveness, so it can be termed in an integrated manner as the socio-eco-economic effectiveness. Ecological and socio-ecological types of effectiveness are determined by the prevention, minimization or elimination of environmental and social harm. Considering that environmental and social losses, for well-known reasons, can never get a fair integrated assessment, in practice it is necessary to apply the indicators of ecological and socio-ecological damage, which do not fully reflect the amount of harm caused. The eco-economic effectiveness of circular business models is associated with the prevention, minimization or elimination of national economy's (economy of the country) existing or possible losses (damage) and/or additional costs caused by human impact to the environment in the process of subsurface use. In this case, we are talking about reducing the amount of eco-economic damage.*

Research results application. *The research makes it possible to study and systematize currently proposed methods for assessing the extent of environmentally related damage caused by mining. The methods considered are intended to be applied in assessing the ecological, socio-ecological and eco-economic effectiveness of environmentally friendly circular business models in this field.*

Key words: *mining; circular business models; environmentally related damage; socio-eco-economic effectiveness.*

Acknowledgements: *Research The research has been carried out with financial support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project no. 20-010-00305A.*

Introduction. According to Russian state reports on the environment (*Minprirody (Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation). State reports "On the state and protection of the environment in the Russian Federation". Available from: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady [Accessed 09 March 2020]*), in Russia it is the mining sector that accounts for a significant amount of environmental impact. The comparative analysis of negative environmental impact indicators made by main industries of the Russian Federation, categorized in accordance with OKVED (Russian National Classifier of Types of Economic Activity), in 2010–2018 reveals a great impact into air contamination made by mineral production by means of discharging pollutants into the outer air from the stationary sources.

Nevertheless, a yet more harmful environmental impact by this type of economic activity is made by generating industrial and consumer waste (table 1). On average, it accounts for 91.4% of total waste.

The statistics of the extent of the damage made by the subsoil use on various elements of the environment and different research results [1–3] convince of the need in improving the level of environmental friendliness of mining processes, particularly by applying environmentally friendly circular business models. The latter are aimed at implementing the concept of circular economy (an economic system of closed loops) focused at forming the economy of closed delivery chains, similar to natural [4–9].

Table 1. Comparative characteristic of the negative impact on the environment caused by the main types of economic activity in Russia in 2010-2018

Таблица 1. Сравнительная характеристика негативного воздействия на окружающую среду основных видов экономической деятельности, осуществляемых в России в период 2010–2018 гг.

Indicators of the negative impact on the elements of the environment	Mean in 2010–2018 by the main types of economic activity					
	Mineral production	Farming, forestry, hunt, fishing and fisheries	Processing	Electricity supply, gasification, steam distribution, air conditioning	Other types of economic activity	Total amount
Effect on the outer air						
Total amount of pollutants discharge into the outer air from the stationary sources, in total, ths t	5176.8	189.5	5868.6	3751.4	3128.0	18110.8
Water management						
Water withdrawal from natural water bodies, mln m^3	3165.9	16982.2	4986.3	41888.4	6369.2	71333.0
Dirty discharge into the surface water bodies, mln m^3	854.6	807.5	2676.1	6843.6	3726.9	14886.6
Water leakage when transporting, mln m^3	16.2	4327.2	93.2	2448.5	532.4	7198.1
Fresh water, mln m^3	1977.9	8863.5	5094.1	37056.8	4084.3	55666.2
Waste production						
Industrial and consumer waste, mln t	4811.6	37.8	299.9	35.8	76.6	5261.7
Efficient energy use						
Total energy comsumption, mln TOE	90.6	18.0	405.1	68.2	561.2	1148.2

Source: compiled by the authors in accordance with the data from State reports "On the state and protection of the environment in the Russian Federation"

Research aim is to substantiate a methodological approach to assessing the effectiveness of using environmentally friendly circular business models in mining enterprises.

Research methodology includes the study, critical assessment and systematization of the methods of environmental circular activity results determination in mineral production.

Research results. The effectiveness of circular business models, which takes into account the possible outcome for the nature, society and economy, is considered as

a condition for their application. Other conditions are commercial effectiveness, technological feasibility, and institutional (economic, legal, administrative) security. They are all interrelated (fig. 1). Without the indicated conditions, the idea of their realization in mining enterprises doesn't make sense.

The effectiveness of circular business models is a composite of ecological, socio-ecological and eco-economic effectiveness (table 2). This approach well meets the concept of calculating losses caused by the human environmental impact "per recipient". Natural environment (nature, ecosystems), society (human being) and national economy (country's or region's economy) are considered as scaled-up recipients in this case.

In this regard it is possible to apply a complex term of *socio-eco-economic effectiveness*.

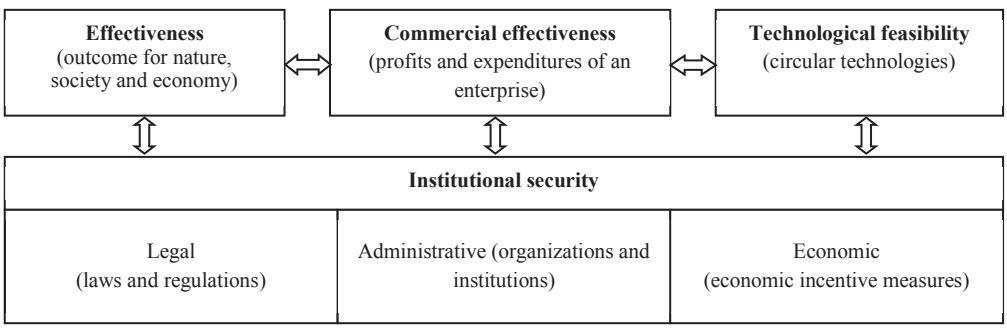


Fig. 1. Conditions of applying circular business models in the field of mining
Рис. 1. Условия применения циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи полезных ископаемых

Ecological and socio-ecological types of effectiveness are determined by prevention, minimization or elimination of environmental and social harm. This condition formulation is based on the authors' opinion that when describing the negative impact on the nature and society comprehensively it is correct to apply the concept of harm, not damage. Damage should be considered as that very part of environmental and social harm which is subject to evaluation carried out in the conditions of a particular direction and character of the evaluation work. Considering that environmental and social losses, for well-known reasons, can never get a fair integrated assessment, in practice it is necessary to apply the indicators of ecological and socio-ecological damage, which do not fully reflect the amount of harm caused.

In O. Ia. Glibko's opinion, "*ecological damage* is a very important component of environmental harm, which evaluates direct and indirect losses of natural resources and is subject to quantitative assessment" [10]. Research author considers it correct to distinguish between the concepts of "economic damage" and "ecological damage", seeing a fundamental difference in their relation to material losses in ecosystems; monetary evaluation of material losses in ecosystems are analyzed from the economy's point of view and environment-forming role – from the ecology's point of view. Due to the natural features' peculiarities, standard economic approaches to property valuation cannot be applied when evaluating the amount of harm caused to them (ecological damage). Ecological damage assessment is associated with pollution and depletion of natural ecosystems and destruction of ecological relations. The assessment has to be carried out "naturally" and expressed by the magnitude of ecological goods complex losses considering the following:

– any business operations or other activity connected with environmental impact is potentially harmful;

– losses in the natural environment may be connected not only with the direct reduction of particular ecological goods but also their growth;

– when assessing human impact, not only particular natural elements have to be considered, but the ecosystem in general, i.e. inter-organizational relations and their alternation;

– it is correct to assess the human impact taking into account some individual factor features of the ecosystem expressed in impact factor complexity;

– direct losses, as a rule, can be estimated with adequate accuracy, while the estimate of indirect losses is of a high-level character;

– when valuating the damage, time factor should be accounted through the estimation of exposure time and the period of restoration.

Table 2. The components of circular business models effectiveness
Таблица 2. Составляющие результативности применения циркулярных бизнес-моделей

Recipients (negative impact objects)	Type of the ecologically related harm	Type of effectiveness
Environment (nature, ecosystems)	Ecological harm (harm caused to the environment)	Ecological effectiveness
Society (human being)	Ecologically related harm to the society	Socio-ecological effectiveness
National economy (country's or region's economy)	Ecologically related harm to economy	Eco-economic effectiveness

In the conditions of subsoil use when assessing harm to natural environment (which consists not only of the outer air, bodies of water, land resources, flora and fauna, but also mineral wealth), apart from the methods developed by biologists and ecologists, the methods for lithosphere impact evaluation (geological environment) should be taken into account which are developed by geologists and geoecologists. Iu. O. Slavikovskaia, L. V. Rudakova and R. B. Rudakov [11] distinguish between the biospheric and lithospheric types of damage. E. I. Panfilov in his article [12], dedicated to the analysis of technogenic impact on subsoil resources, proposes the notion of "geological damage" meaning damage done to the geological medium from human activity in the course of its investigation, field development (exploitation) and completion of development (mining), i.e. abandonment (temporary shutdown) of mine facilities.

The development of the feedstock base is connected not only with current, but also with the accumulated ecological damage; in accordance with *Rosproridnadzor (Federal Service for Supervision of Natural Resources Use) order of 25 April 2012 "On the establishment of Methodological recommendations on doing an inventory of facilities with accumulated ecological damage*" is characterize as "harm caused to the environment or its components as a result of business operations or other activities including violation of environmental law including material losses (expenditure) on mitigation and prevention of detrimental consequences from the environmental harm". The sites with the accumulated environmental damage are "polluted territories including vacant territories which appeared as a result of former business activity, as well as waste disposal sites and other facilities (buildings, structures, and polluted land lots) which are polluted and accumulate pollution around, and where business activity was carried out in the past leaving waste which has negatively affected the natural environment".

Accumulated environmental damage facilities inventory carried out in accordance with the instructions from the Government of the Russian Federation of 3 October 2012 no. DM-P9-5838 has made it possible, among other things, to distinguish between the following types of facilities with the accumulated environmental damage in our country: the results of former business activity in the field of mining and ore-dressing; oily

pollution; accumulated environmental damage facilities of the processing industry [13]. An overwhelming majority of the territories has been contaminated as a result of the former business activity in the field of mining and ore-dressing; land lots hosting dumps and tailing pits are usually either unowned or were/are owned by bankrupt companies being state-owned or municipally owned. According to the data from Russian Minprirody preliminary estimate, the most problematic constituent entities of the Russian Federation are Zabaykalsky Krai, Kemerovo region, Sverdlovsk region, and the Sakha (Yakutia) Republic.

Since 2014 the Federal target program "Elimination of the accumulated environmental damage" for 2014–2025 has started its operation; the aim the program is to restore the disturbed ecosystems earlier exposed to the negative man-made and technogenic impact as a result of former business activity. In order to achieve the goal, a solution to the problem has been specified on ecological restoration of the territories which have been exposed to negative impact from the facilities of the accumulated environmental damage as a result of former business activity in the field of mining and ore-dressing.

The accumulated environmental damage is conditioned by the accumulation of hazardous concentrations of pollutants in soil and water, while at the same time it is oriented towards reduction as soon as the natural environment possesses the assimilation potential associated with the process of adsorption (artificial substance decaying and their negative impact elimination) [14].

Socio-ecological damage is a component of the harm caused to the population as a result of human impact on the environment. Similar to the ecological damage, taking into account the peculiarities of population as a research object, when assessing the harm caused to the population (socio-ecological damage), some special methods of assessing the damage to life and health of population have to be applied. The assessment of socio-ecological damage has to be carried out "naturally" by medical scientists and expressed by the magnitudes of morbidity and mortality level rise and life quality and expectancy fall.

Both ecological and socio-ecological damages are associated with a number of technogenic risks of subsoil resources development, namely risks of strong technogenic impacts associated with the negative environmental impact in the conditions of normal (accident-free) business activity together with the risks of catastrophic technogenic impacts caused by technogenic catastrophes, accidents and incidents [15]. System analysis of methodological approaches to the assessment of the consequences of mining enterprises environmental impact is presented by the scientists of the Institute of Economics UB RAS [11, 16].

Eco-economic effectiveness of circular business models is associated with the prevention, minimization or elimination of national economy's (economy of the country) existing or possible losses (damage) and/or additional costs caused by human impact to the environment in the process of subsurface use. In this case, we are talking about reducing the magnitude of eco-economic damage.

Traditional procedure for determining eco-economic damage consists in composite monetary estimate of all "natural" (ecological and socio-ecological) damages connected with human impact on the environment. In this case, losses (damages) and costs caused by the adverse change in the environment itself are taken into account, but it is correct to consider losses (damages) and costs from the changed properties of the recipients' environment. The recipients are the following: agricultural land and animals, forest reserves, fishery resources, property assets of industry and transport, facilities of housing, utility, and personal service infrastructures, and leisure and medical resort facilities as core assets for business activity which take up the human impact on the environment as well as the population as a base for reproduction and economic (labor force) resource.

Interim standard procedure of 1986 has been the first in this country to comprehensively describe the essence of eco-economic damage through the category of "economic damage caused to the national economy by the environmental contamination". According to the Procedure's logic, it turns out that eco-economic damage consists of the sum of two types of expenses: *precautionary (prevention) costs* incurred to avoid the impact of the changed environment on the recipients (expenditures for sewage dilution, water treatment, air conditioning, building noise control installations, and waste collection and burial); *liquidation costs* are expenditures aimed at compensating for the changed environment impact on the recipients (for example, expenditures for medical treatment, compensation for the loss of goods caused by the decline in productivity of the fixed assets of land, forest, water, etc. resources).

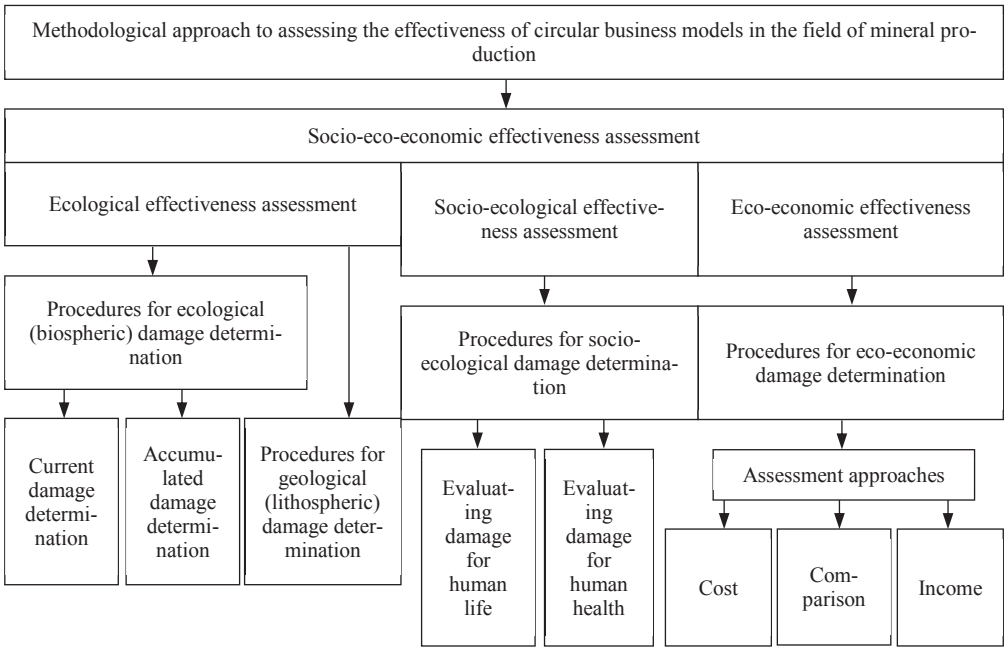


Fig. 2. Methodological approach to the estimation of circular business models effectiveness in the field of mineral production

Рис. 2. Методологический подход к оценке результативности применения циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи полезных ископаемых

E. V. Riumina considers the essence of two approaches to the determination of eco-economic damage that can possibly be applied calling it "economic damage from ecological disturbances" [17]: depending on the state of the environment and on the amount and character of harmful emissions.

According to E. V. Riumina, the first approach is actively realized in western countries through comparative and market methods [18]. Comparative methods (analogue approach) are presented by the method of control areas based on the hypothesis about the fact that the indicators of recipients' condition directly determining the magnitude of eco-economic damage in the investigated and control (matching in various social, economic, and ecological parameters with the region under investigation) regions depend only on pollution concentration. The following scheme of forming the eco-economic damage is used when applying this method: firstly, the environment is exposed to human impact and its parameters are changed, secondly, the changed environment influences the recipients which results in economic losses. Market methods

are based on the subjective factors of cost and realized by means of sociological research; they are presented by the following: willingness-to-pay method, willingness-to-get-compensation method, hedonic method (a method for determining the price of ecological goods in the minds of population), and transportation costs method. The methods of analytical dependences (dose response technique) which is frequently presented in textbooks and scientific publications is not taken into account by E. V. Riumina in the damage assessment procedures classification as soon as it is considered as a method for processing statistical data which can be obtained through any damage assessment method.

The second approach to eco-economic damage determination, connected with the calculation of the amount and character of harmful emissions into the environment, provides for the use of the system of standards fixing the dependence between the negative effects and the main damage-forming factors. M. N. Ignatieva, A. A. Litvinova and V. A. Ignatiev [19] distinguish between the following: the impact factors depending on the parameters of the sources, their density, as well as on climate, topography and other parameters of the territory; factors of perception characterized by the structure and the number of recipients; the factors of condition determining losses per one unit of the percipient. This approach is actively applied in this country. In accordance with this approach, *Interim standard procedure of 1986* was created, which contains the procedures of calculating the damage caused by air, water basin, and acoustic medium contamination, and *The Procedure of averted ecological damage determination by Goskomekologii of Russia, 1999*, which includes the procedures of calculating the damage done to the atmosphere, water resources, soil and land resources, and biological resources.

When assessing eco-economic damage, scientists [17, 19, 20] propose that there should be a distinction between the methods for assessing the damages caused by regular ecological disturbances (for example, caused by environmental contamination by permanent sources of pollution) and damages caused by emergencies (random hazardous processes of natural or technogenic character). In the latter case, environmental impact has to be considered as a possible process.

From the authors' point of view, it's reasonable to systematize the types of eco-economic damage, which is an economic category above all, based on traditional methodology of assessing the value of economic assets and providing for the distinction between income, cost, and comparison approaches. It is suggested that income approach includes the method of indirect estimates presented in *Interim standard procedure of 1986*, which contains the procedures of calculating the damage caused by air, water basin, and acoustic medium contamination, and *The Procedure of averted ecological damage determination by Goskomekologii of Russia, 1999*, willingness-to-pay method, willingness-to-get-compensation method, and transportation costs method. Method of control areas and method of control areas may be applied as comparative approaches. The authors agree with A. V. Vusov [21] in his opinion that it is possible to use the methods of income approach in order to determine half-received and lost profit.

Research results application. The research has made it possible to substantiate the methodological approach to the evaluation of the effectiveness of circular business models in mining (fig. 2), study and systematize currently proposed methods for assessing the extent of environmentally related damage caused by mining. The methods considered are intended to be applied in assessing the ecological, socio-ecological and eco-economic effectiveness of environmentally friendly circular business models in this field.

REFERENCES

1. Zeng F. Eco-environmental geological evaluation of environmental impact of mining. In: I*nternational Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence, ATCI 2019. Huainan. China. 22–24 June 2019*. 2020; 1017: 2041–2045.

2. Lapčík V., Kohut O., Novák P., Kaločajová A. Environmental impacts of mining of mineral resources. *Inzynieria Mineralna*. 2018; 2018 (2): 253–263.

3. Päivi H.-M. Kinnunen, Anna H. Kaksonen. Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization. *Journal of Cleaner Production*. 10 August 2019; 228: 153–160. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171 [Accessed 06 February 2020].

4. Efigênia Rossi, Ana Carolina Bertassini, Camila dos Santos Ferreira, Weber Antonio Neves do Amaral, Aldo Roberto Ometto. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases. *Journal of Cleaner Production*. 20 February 2020; 247. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137 [Accessed 06 February 2020].

5. Heidi Simone Kristensen, Mette Alberg Mosgaard. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*. 10 January 2020; 243. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531 [Accessed 06 February 2020].

6. Sânia da Costa Fernandes, Daniela C. A. Pigosso, Tim C. McAloone, Henrique Rozenfeld. Towards product-service system oriented to circular economy: A systematic review of value proposition design approaches. *Journal of Cleaner Production*. June 2020; 257.1. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120507 [Accessed 06 February 2020].

7. Heidi Simone Kristensen, Mette Alberg Mosgaard. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? *Journal of Cleaner Production*. 10 January 2020. Vol. 243. Available from: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531 [Accessed 06 February 2020].

8. Accenture. Circular Advantage: Innovative business models and technologies to create value in a world without limits to growth. *Accenture*. 2014. Available from: https://www.accen-ture.com/t20150523T053139__w__/us-en/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/Dot-Com/Documents/Global/PDF/Strategy_6/Accenture-Circular-Advantage-Innovative-Business-Models-Technologies-Value-Growth.pdf [Accessed 20 February 2020].

9. Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Available from: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Exec-Summary-CE_Russian_TCE_Vol1.pdf [Accessed 15 July 2019]. (In Russ.)

10. Glibko O. Ia. Problems of establishing modern theory of environmental damage. *Teoreticheskaia i prikladnaia ekologiia = Theoretical and Applied Ecology*. 2011; 3: 10–15. (In Russ.)

11. Slavikovskaia Iu. O., Rudakova L. V., Rudakov R. B. Assessment of anthropogenic impact of mining enterprises on the environment. *Zhurnal ekonomicheskoi teorii = Russian Journal of Economic Theory*. 2016; 4: 124–135. (In Russ.)

12. Panfilov E. I. Assessing the impact on the subsoil resources and possible outcome of developing mineral deposits. *Gornaia promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2008; 2: 26–32. (In Russ.)

13. Pinaev V. E., Chernyshev D. A. *Elimination of the accumulated ecological damage, organizational and legal aspects: monograph*. Moscow: Mir nauki; 2017. Available from: http://izd-mn.com/PDF/07MNNPM17.pdf [Accessed 06.02.2020]

14. Novoselov A. L. Economic evaluation of former damage with the account of input data uncertainty. *Vestnik universiteta = Bulletin of University*. 2012; 10: 144–149.

15. Oleinik K. A. Ecological risks of business (enterpreneural) activity: gist and main types. *Upravlenie riskom = Risk Management*. 2000; 3: 42–44. (In Russ.)

16. Pakhomov V. P., Ignatieva M. N., Litvinova A. A. *Methodological guidelines on assessing the damage from technogenic catastrophes of mining nature: scientific report*. Ekaterinburg: Institute of Economics UB RAS Publishing; 2006. (In Russ.)

17. Riumina E. V. Assessing economic damage from ecological disturbances when developing plans and programs. In: *Assessing environmental impact in CIS countries and Eastern Europe: collected works*. Moscow: Gosudarstvennyi reestr ekologicheskikh programm Publishing; 2004. p. 33–40.

18. Riumina E. V. Damage from ecological disturbances: there are more questions than answers. *Ekonomika prirodopolzovaniia = Journal of Environmental Economics*. 2004; 4: 55–65. (In Russ.)

19. Ignatieva M. N., Litvinova A. A., Ignatiev V. A. Classifying the methods of assessing economic damage conditioned by the negative impact of human activity on the environment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2009; 6: 13–19. (In Russ.)

20. Ignatieva M. N., Litvinova A. A., Loginov V. G. *Methodological tools for economic evaluation of the consequences of mining complexes environmental impact*. Ekaterinburg: Institute of Economics UB RAS Publishing; 2010. (In Russ.)

21. Vusov A. V. The review of the methods of ecological harm monetary evaluation in Russia and in the world. In: *Economics and modern management: theory and practice. Proc. 4th Internat. Sci-pract. Conf no. 4*. Novosibirsk: SibAK Publishing; 2011. Available from: https://sibac.info/conf/econom/iv/55657 [Accessed 06.02.2020].

Received 20 March 2020

Information about authors:

Liudmila A. Mochalova – DSc (Economics), Associate professor, Head of the Department of Economy and Management, Ural State Mining University. E-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru
Olga G. Sokolova – PhD (Economics), Associate professor, associate professor of the Department of Economy and Management, Ural State Mining University. E-mail: olga.sokolova@m.ursmu.ru

УДК 504.06:622 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-80-89

Оценка социально-эколого-экономической результативности применения циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи полезных ископаемых

Мочалова Л. А.[1], Соколова О. Г.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Реферат

Введение. *В соответствии с государственными докладами о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации на такой вид экономической деятельности, как добыча полезных ископаемых, в России приходится значительный объем воздействия на окружающую среду.*

Цель работы *заключается в обосновании методологического подхода к оценке результативности применения экологически безопасных циркулярных бизнес-моделей на предприятиях горнодобывающего производства.*

Методика проведения исследований. *Исследования проводятся путем изучения, критической оценки и систематизации методик определения результатов от экологически ориентированной циркулярной деятельности в сфере добычи полезных ископаемых.*

Результаты исследований. *Результативность циркулярных бизнес-моделей рассматривается как одно из условий их применения. Она складывается из экологической, социально-экологической и эколого-экономической результативности, поэтому ее можно обозначить комплексным термином – социально-эколого-экономическая результативность. Экологическая и социально-экологическая результативность определяются недопущением, минимизацией или ликвидацией наносимого вреда окружающей природной среде и обществу. При учете того, что потери в природе и обществе по известным причинам никогда не могут получить объективной комплексной оценки, на практике приходится применять показатели экологического и социально-экологического ущерба, в полной мере не отражающие величину наносимого вреда. Эколого-экономическая результативность применения циркулярных бизнес-моделей связана с недопущением, минимизацией или ликвидацией имеющих место либо возможных потерь (убытков) и/или дополнительных затрат от антропогенного воздействия на окружающую среду для народного хозяйства (экономики страны) в процессе недропользования. В данном случае речь идет о снижении величины эколого-экономического ущерба.*

Область применения результатов. *Проводимое исследование позволяет изучить и систематизировать предлагаемые в настоящее время методики по определению величины экологически обусловленного ущерба, наносимого добычей полезных ископаемых. Рассмотренные методики предполагается применить при оценке экологической, социально-экологической и эколого-экономической результативности экологически безопасных циркулярных бизнес-моделей в данной сфере деятельности.*

Ключевые слова: *добыча полезных ископаемых; циркулярные бизнес-модели; экологически обусловленный ущерб; социально-эколого-экономическая результативность.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 20-010-00305А.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zeng F. Eco-environmental geological evaluation of environmental impact of mining // International Conference on Applications and Techniques in Cyber Intelligence, ATCI 2019. Huainan. China. 22–24 June 2019. 2020. Vol. 1017. P. 2041–2045.
2. Lapčík V., Kohut O., Novák P., Kaločajová A. Environmental impacts of mining of mineral resources // Inzynieria Mineralna. 2018. Vol. 2018. Issue 2. P. 253–263.
3. Päivi H.-M. Kinnunen, Anna H. Kaksonen. Towards circular economy in mining: opportunities and bottlenecks for tailings valorization // Journal of Cleaner Production. 10 August 2019. Vol. 228. P. 153–160. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.171 (date of issue: 06.02.2020).
4. Efigênia Rossi, Ana Carolina Bertassini, Camila dos Santos Ferreira, Weber Antonio Neves do Amaral, Aldo Roberto Ometto. Circular economy indicators for organizations considering sustainability and business models: Plastic, textile and electro-electronic cases // Journal of Cleaner Production. 20 February 2020. Vol. 247. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119137 (date of issue: 06.02.2020).
5. Heidi Simone Kristensen, Mette Alberg Mosgaard. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? // Journal of Cleaner Production. 10 January 2020. Vol. 243. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531 (date of issue: 06.02.2020).

6. Sânia da Costa Fernandes, Daniela C. A. Pigosso, Tim C. McAloone, Henrique Rozenfeld. Towards product-service system oriented to circular economy: A systematic review of value proposition design approaches // Journal of Cleaner Production. June 2020. Vol. 257.1. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120507 (date of issue: 06.02.2020).

7. Heidi Simone Kristensen, Mette Alberg Mosgaard. A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability? // Journal of Cleaner Production. 10 January 2020. Vol. 243. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118531 (date of issue: 06.02.2020).

8. Accenture. Circular Advantage: Innovative business models and technologies to create value in a world without limits to growth // Accenture. 2014. URL: https://www.accen-ture.com/t20150523T053139__w__/us-en/_acnmedia/Accenture/Conversion-Assets/Dot-Com/Documents/Global/PDF/Strategy_6/Accenture-Circular-Advantage-Innovative-Business-Models-Technologies-Value-Growth.pdf (дата обращения: 20.02.2019).

9. Навстречу циклической экономике. Экономическое обоснование для бизнеса в целях ускоренного перехода к устойчивому развитию. URL: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Exec-Summary-CE_Russian_TCE_Vol1.pdf (дата обращения: 15.07.2019).

10. Глибко О. Я. Проблемы становления современной теории экологического ущерба // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 10–15.

11. Славиковская Ю. О., Рудакова Л. В., Рудаков Р. Б. Оценка последствий техногенного воздействия предприятий горнопромышленного комплекса на окружающую среду // Журнал экономической теории. 2016. № 4. С. 124–135.

12. Панфилов Е. И. Оценка воздействия на недра и возможные последствия при разработке месторождений полезных ископаемых // Горная промышленность. 2008. № 2. С. 26–32.

13. Пинаев В. Е., Чернышев Д. А. Ликвидация накопленного экологического ущерба – организационные и правовые аспекты: монография. М.: Мир науки, 2017. URL: http://izd-mn.com/PDF/07MNNPM17.pdf (дата обращения: 06.02.2020)

14. Новоселов А. Л. Экономическая оценка прошлого ущерба с учетом неопределенности исходных данных // Вестник университета. 2012. № 10. С. 144–149.

15. Олейник К. А. Экологические риски хозяйственной (предпринимательской) деятельности: сущность, основные виды // Управление риском. 2000. № 3. С. 42–44.

16. Пахомов В. П., Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Методические положения оценки ущерба от техногенных катастроф горнопромышленного характера: научный доклад. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2006. 60 с.

17. Рюмина Е. В. Оценка экономического ущерба от экологических нарушений при разработке планов и программ // Проведение оценки воздействия на окружающую среду в государствах-участниках СНГ и странах Восточной Европы: сб. ст. М.: Государственный реестр экологических программ, 2004. С. 33–40.

18. Рюмина Е. В. Ущерб от экологических нарушений: больше вопросов, чем ответов // Экономика природопользования. 2004. № 4. С. 55–65.

19. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Игнатьев В. А. Классификация методик оценки экономического ущерба, обусловленного отрицательным воздействием антропогенной деятельности на окружающую среду // Известия вузов. Горный журнал. 2009. № 6. С. 13–19.

20. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Логинов В. Г. Методический инструментарий экономической оценки последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2010. 168 с.

21. Вусов А. В. Обзор методов стоимостной оценки экологического вреда в России и мире // Экономика и современный менеджмент: теория и практика: сб. ст. по матер. IV междунар. науч.-практ. конф. № 4. Новосибирск: СибАК, 2011. URL: https://sibac.info/conf/econom/iv/55657 (дата обращения: 06.02.2020).

Поступила в редакцию 20 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Мочалова Людмила Анатольевна – доктор экономических наук, доцент, заведующая кафедрой экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: lyudmila.mochalova@m.ursmu.ru

Соколова Ольга Геннадьевна – кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры экономики и менеджмента Уральского государственного горного университета. E-mail: olga.sokolova@m.ursmu.ru

Для цитирования: Мочалова Л. А., Соколова О. Г. Оценка социально-эколого-экономической результативности применения циркулярных бизнес-моделей в сфере добычи полезных ископаемых // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 80–89 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-80-89

For citation: Mochalova L. A., Sokolova O. G. Assessment of socio-eco-economic effectiveness of circular business models in mineral production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 80–89. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-80-89

УДК 328:622.33 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-90-98

Оценка организационно-экономических отношений персонала в процессе инновационного развития угледобывающего производственного объединения

Костарев А. С.[1]

[1] Производственное объединение «СУЭК-Хакасия», г. Черногорск, Республика Хакасия, Россия

e-mail: kostarevas@suek.ru

Реферат

Актуальность исследования *обусловлена тем, что недостаточная согласованность представлений работников по поводу необходимости и содержания инновационного процесса в целом и конкретных инноваций, а также способов их реализации приводит к снижению результативности инновационной деятельности даже при осуществлении необходимых финансовых затрат.*

Цель работы. *Разработка методики оценки организационно-экономических отношений персонала угледобывающего производственного объединения для определения направлений повышения эффективности инновационной деятельности.*

Методы исследования. *Использованы методы сравнения, структурно-функционального анализа, анкетирования, статистического анализа.*

Результаты исследований. *Организационно-экономические отношения субъектов инновационного развития рассматриваются как совокупность связей между ними в процессе инициирования, разработки, освоения и реализации инноваций по поводу распределения и использования производственных ресурсов, выявления и реализации резервов. Для их оценки обоснованы критерии – нацеленность работников на участие в инновационном развитии и согласованность их взаимодействия. Разработана оценочная шкала нацеленности работников на инновационное развитие и предложены показатели, позволяющие количественно определить сбалансированность организационно-экономических отношений.*

Вывод. *Применение разработанной методики для ретроспективного анализа изменения организационно-экономических отношений на различных этапах развития угледобывающего производственного объединения «СУЭК-Хакасия» позволило подтвердить ее правомерность, выявить как позитивные, так и негативные тенденции и наметить корректирующие мероприятия.*

Ключевые слова: *инновации; стратегия инновационного развития; угледобывающее производственное объединение; организационно-экономические отношения.*

Введение. Ускорение темпов технологического развития и повышение динамичности внешней среды обусловливают необходимость для предприятий быстрее осваивать новые технологические решения, искать способы улучшения управления и вовлечения персонала в инновационные процессы с целью сохранения конкурентоспособности и повышения эффективности своей деятельности [1–4].

По оценкам специалистов, уровень инновационной активности персонала отечественных предприятий является недостаточным для обеспечения их долгосрочной конкурентоспособности [4]. Аналогичная ситуация характерна и для угледобывающих предприятий. Результаты анкетирования персонала угледобывающих предприятий показывают, что около 50 % полагают, что инновации нужны. Вместе с тем количество инновационных предложений за год в расчете на одного работника составляет лишь 0,01 %, т. е. не более 1 человека из 100 работников принимает реальное участие в инновационной деятельности, что является явно

недостаточным для преодоления разрыва в показателях производительности труда с зарубежными угледобывающими предприятиями [6].

Для повышения динамики инновационного развития угледобывающих производственных объединений в долговременном периоде в условиях смены технологических укладов и обострения конкуренции на мировых рынках требуется не только обновление технико-технологического обеспечения, но и формирование таких организационно-экономических отношений персонала предприятия, которые позволяют преодолевать существующие ограничения повышения эффективности инновационной деятельности [7–8]. Исследования, проведенные R. Abukhait, R. Pillai, показали, что вовлеченность персонала в инновационное развитие является результатом различных факторов, таких как оплата, среда обучения, развитие карьеры, содержание работы, благоприятная среда и рабочее время [9]. В совокупности все эти факторы определяют организационно-экономические отношения.

В данном исследовании под организационно-экономическими отношениями понимается совокупность связей между субъектами угледобывающего производственного объединения в процессе осуществления производственной деятельности по поводу распределения и использования производственных ресурсов, выявления и реализации резервов. Они возникают в процессе выполнения ими своих производственных функций и обусловлены установками, интересами и ответственностью этих субъектов. В контексте инновационного развития рассматриваются производственные функции по инициированию, разработке, освоению и реализации инноваций.

Н. В. Галкина [10], Т. А. Коркина [11], М. Н. Полещук [12] и ряд других авторов рассматривали влияние различных видов отношений персонала горнодобывающих предприятий на результаты инновационной деятельности.

Н. В. Галкина, исследуя адаптацию угледобывающего предприятия к инновационной модели развития, отмечает особую значимость в этом процессе социально-экономических и организационно-экономических отношений, в основе которых сбалансированность интересов и ответственности субъектов. По уровню сбалансированности интересов и ответственности выделено 4 типа взаимодействия субъектов: *разрушительный*, характеризующийся противоборством интересов и отсутствием ответственности за результаты; *конфликтный*, при котором интересы субъектов недостаточно подкреплены их ответственностью; *компромиссный*, когда каждый из субъектов поступается частью своих интересов ради достижения общей цели; и *комплементарный* – учтены и реализуются интересы каждого субъекта при соответствующем подкреплении ответственностью. В работе Т. А. Коркиной, Е. В. Кучиной, В. А. Макаровой организационно-экономические отношения оценивались по критерию вовлеченности работников в процесс повышения производительности труда. Для повышения эффективности инновационных групп на угледобывающих предприятиях М. Н. Полещук идентифицировала социально-трудовые отношения по взаимодополняемости таких качеств субъектов, участвующих в реализации инновации, как мотивация, квалификация, ответственность и полномочия, необходимые для решения задачи. Оценка отношений в рассматриваемом исследовании проводилась по двум направлениям: по степени совпадения самооценки работника и оценки указанных качеств руководителем; по соответствию этих составляющих работника поставленной задаче.

Исследования указанных авторов показали, что качество отношений и взаимодействия персонала существенно влияет на расход ресурсов в инновационном

процессе и достижимость запланированных результатов. Особое значение при этом придается представлениям персонала о необходимости и направлениях изменений.

Методика оценки организационно-экономических отношений персонала в процессе инновационного развития. Анализ реализованных и нереализованных инноваций, направленных на улучшение техники, технологии, организации и управления, показал, что ключевым фактором их результативности является нацеленность работников на изменения, под которой понимается осознанное и ответственное участие в разработке, освоении и реализации инноваций. Недостаточная согласованность позиций работников по поводу необходимости конкретной инновации и способов ее реализации приводит к повышению рисков недостижения запланированных результатов, даже при осуществлении необходимых финансовых затрат [12].

Таблица 1. Шкала оценки нацеленности работников на участие в инновационном развитии предприятия, угледобывающего производственного объединения, компании
Table 1. Rating scale of personnel focus on participation in innovation process at an enterprise, coal mining production association, company

Балл	Позиция работника по нацеленности:			
	на обеспечение конкурентоспособности	на обеспечение инвестиций	на улучшения	на организацию улучшений
4	Это моя обязанность и обязанность моего непосредственного руководителя, руководства предприятия, объединения и компании	Инвестиции в деятельность предприятия являются результатом совместного труда	Улучшение процессов – обязанность каждого работника	Процесс улучшений производства должен быть непрерывен и взаимосогласован с текущей деятельностью
3	Это обязанность моего руководителя, руководства предприятия, объединения и компании	Инвестиции в деятельность предприятия – результат работы руководства предприятия, объединения и компании	Улучшение процессов – обязанность руководства предприятия, объединения и компании	Улучшения производства должны осуществляться циклично
2	Это обязанность руководства предприятия, объединения и компании	Инвестиции в деятельность предприятия – результат работы руководства объединения и компании	Улучшение производства – обязанность руководства объединения и компании	Улучшения процессов должны осуществляться по личной инициативе
1	Это обязанность руководства объединения и компании	Компания обязана осуществлять техническое перевооружение	Улучшения – обязанность руководства компании	Улучшения процессов должны осуществляться по заданию руководства

Исходя из этого, в качестве основания для оценки организационно-экономических отношений предлагается применять осознанность персоналом необходимости и своей ответственности за разработку инноваций и организацию процесса непрерывных улучшений деятельности, повышение на этой основе инвестиционной привлекательности и конкурентоспособности угледобывающего производственного объединения. Но поскольку в рамках одного предприятия уровень нацеленности на инновационное развитие может существенно отличаться у разных работников, то необходимо оценивать и уровень согласованности позиций работников по нацеленности.

Для выявления уровня нацеленности работников на инновационное развитие предлагается применять метод анкетирования с использованием разработанной оценочной шкалы (табл. 1) [13].

По итогам анкетирования уровень нацеленности персонала угледобывающего производственного объединения на развитие предлагается определять по среднему значению:

$$\mathrm{O}_{\text{ср}} = \frac{1}{4}\sum_{j=1}^{4}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n}\mathrm{O}_{ij}}{n}\right), \tag{1}$$

где O_{ij} – оценка i-го работника позиции по j-й составляющей нацеленности; 4 – количество составляющих, по которым оценивается позиция работника; n – количество работников.

Таблица 2. Характеристика типов организационно-экономических отношений
Table 2. Characteristics of business relation types

Тип организационно-экономических отношений	Нацеленность работника	Согласованность позиций
Органичный	Высокая: $\mathrm{O}_{\text{ср}} \geq 3{,}25$	Высокая: $K_{\text{с}} \geq 0{,}75$
Компромиссный	От средней до высокой: $\mathrm{O}_{\text{ср}} \geq 2{,}5$	От средней до высокой: $K_{\text{с}} \geq 0{,}5$
Конфликтный	От низкой до высокой: $\mathrm{O}_{\text{ср}} \geq 1{,}75$	От низкой до высокой: $K_{\text{с}} \geq 0{,}25$
Конфликтно-разрушительный	От очень низкой до высокой: $\mathrm{O}_{\text{ср}} \geq 1$	От очень низкой до высокой: $K_{\text{с}} \geq 0$

Количественную оценку согласованности позиций работников угледобывающего производственного объединения предлагается осуществлять с применением коэффициента конкордации (формулы (2) и (3)):

Согласованность оценок i-го работника со средней оценкой позиций персонала определяется по формуле:

$$K_{\text{с}i} = 1 - \frac{\left|\mathrm{O}_i - \mathrm{O}_{\text{ср}}\right|}{\mathrm{O}_{\max} - \mathrm{O}_{\min}}, \tag{2}$$

где O_i – оценка i-го работника; $\mathrm{O}_{\max}$, $\mathrm{O}_{\min}$ – максимально и минимально возможное значение оценки соответственно.

Средний уровень согласованности по всем работникам:

$$K_{\text{с}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} K_{\text{с}i}}{n}. \tag{3}$$

Собственные наблюдения, анализ исследований других авторов, а также результатов деятельности ряда угледобывающих производственных объединений позволил выделить четыре типа организационно-экономических отношений,

которые отличаются уровнем нацеленности работников на участие в процессе инновационного развития и согласованности их позиций: органичные, компромиссные, конфликтные и конфликтно-разрушительные (табл. 2). *Органичные* отношения характеризуются тем, что субъекты этих отношений осознают возможности удовлетворения своих интересов и свою ответственность за разработку, освоение и реализацию инноваций, их действия согласованы и направлены на достижение общей цели инновационного развития. *Компромиссный* тип отношений формируется, когда субъекты готовы участвовать в инновационной деятельности, поскольку осознают ее необходимость, но не готовы нести ответственность за ее результаты. *Конфликтные* отношения возникают при значительной вариабельности среди субъектов уровня нацеленности на инновационное развитие. Для *конфликтно-разрушительных* отношений характерна разнонаправленность целей и действий субъектов.

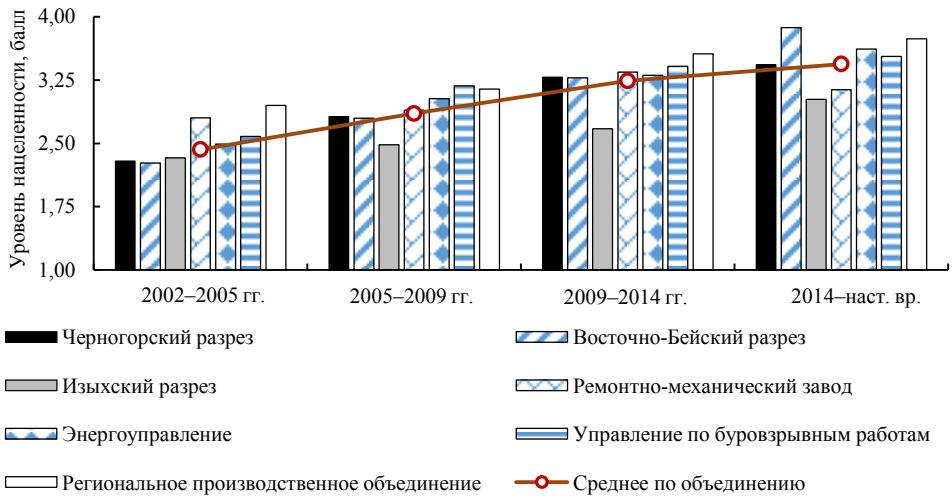


Рис. 1. Динамика нацеленности на участие в инновационном процессе персонала «СУЭК-Хакасия» (по результатам анкетирования 541 чел.)
Fig. 1. Dynamics of SUEK-Khakasia personnel focus on participation in innovation process (according to questionnaire of 541 persons)

Интегральный показатель, характеризующий тип организационно-экономических отношений в целом по угледобывающему производственному объединению, предлагается определять по формуле:

$$K_{\text{со}} = \left(\text{О}_{\text{ср}} - 1\right) K_{\text{с}} \frac{\text{Б}_i}{4}, \tag{4}$$

где $K_{\text{со}}$ – коэффициент сбалансированности организационно-экономических отношений; $\text{О}_{\text{ср}}$ – средний уровень нацеленности персонала на изменения; Б_i – коэффициент, позволяющий повысить симметричность матрицы,

$$\text{Б}_i = \begin{cases} 4, \ \textit{если } \text{О} \geq 3{,}25; K_{\text{с}} \geq 0{,}75, \\ 3, \ \textit{если } 3{,}25 > \text{О} \geq 2{,}5; \ K_{\text{с}} \geq 0{,}5 \ \textit{или } \text{О} \geq 3{,}25; \ 0{,}75 > K_{\text{с}} \geq 0{,}5, \\ 2, \ \textit{если } 2{,}5 > \text{О} \geq 1{,}75; \ K_{\text{с}} \geq 0{,}25 \ \textit{или } \text{О} \geq 2{,}5; \ 0{,}5 > K_{\text{с}} \geq 0{,}25, \\ 1, \ \textit{если } \text{О} < 1{,}75 \ \textit{или } K_{\text{с}} < 0{,}25. \end{cases}$$

Поскольку коэффициент сбалансированности организационно-экономических отношений изменяется в пределах от 0 до 3, а типов отношений четыре, то математически определены следующие его значения, соответствующие определенному типу отношений: 0–0,75 – конфликтно-разрушительный; 0,75–1,5 – конфликтный; 1,5–2,25 – компромиссный; 2,25–3,00 – органичный.

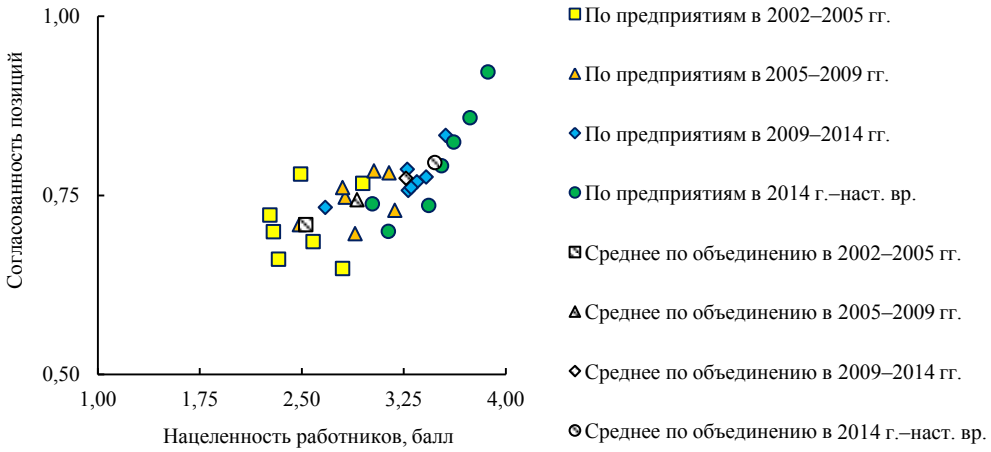


Рис. 2. Динамика организационно-экономических отношений персонала в процессе инновационного развития («СУЭК-Хакасия», 2002–2018 гг.)
Fig. 2. Dynamics of personnel business relations in the process of innovative development (SUEK-Khakasia, 2002–2018)

Апробация методики. Проверка практической значимости разработанной методики осуществлялась в угледобывающем производственном объединении ООО «СУЭК-Хакасия». Было проведено анкетирование работников всех предприятий, входящих в состав объединения, и ключевых уровней управления. Выборка осуществлялась пропорционально численности персонала предприятий и составила 18 % всех работников объединения. Анкетируемые оценивали нацеленность работников на участие в инновационном развитии на четырех, предварительно выделенных, этапах развития объединения (описаны в [12]).

Анализ результатов анкетирования с применением разработанных показателей выявил существенное изменение за исследуемый период организационно-экономических отношений: в среднем по объединению нацеленность на инновационное развитие выросла с 2,43 баллов, что соответствовало низкому уровню, до 3,44 баллов, т. е. высокого уровня (рис. 1). При этом по отдельным предприятиям динамика значительно различается, например, на разрезе «Изыхский» достигнут только средний уровень нацеленности персонала на инновационное развитие, а на Восточно-Бейском разрезе – высокий.

На первом этапе развития объединения (2002–2005 гг.), по оценкам анкетируемых, тип организационно-экономических отношений был ближе к конфликтному, в настоящее время он приближается к органичному (рис. 2).

Более значительное изменение произошло на уровне нацеленности работников по сравнению с динамикой согласованности позиций. Такая ситуация объясняется формированием и развитием в объединении системы непрерывных улучшений производства. Отметим, что в целом темп изменения организационно-экономических отношений замедляется: если на втором этапе раз-

вития по сравнению с первым коэффициент сбалансированности отношений вырос в 1,3 раза, на третьем по сравнению со вторым – в 1,6 раза, то на четвертом этапе – только в 1,1 раза. Это свидетельствует о необходимости усиления внимания руководителей объединения к разработке и реализации мер по повышению заинтересованности персонала в разработке и реализации инноваций.

Выводы. Организационно-экономические отношения в процессе инновационного развития объединения определяются нацеленностью работников на инновации и согласованностью их в процессе взаимодействия при реализации этих инноваций. Применение разработанных показателей оценки для ретроспективного анализа изменения организационно-экономических отношений на различных этапах развития угледобывающего производственного объединения «СУЭК-Хакасия» позволило подтвердить правомерность методики и возможность ее применения для планирования инновационного развития угледобывающего производственного объединения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eiriz V., Faria A., Barbosa N. Firm growth and innovation: towards a typology of innovation strategy // Innovation. 2013. Vol. 15. No. 1. P. 97–111.

2. Яковлев В. Л. Внутрипроизводственное планирование в условиях инновационного развития угледобывающего предприятия. Челябинск: АБРИС, 2019. 164 с.

3. Talke K., Salomo S., Kock A. Top management team diversity and strategic innovation orientation: the relationship and consequences for innovativeness and performance // Journal of Product Innovation Management. 2011. Vol. 28. No. 6. P. 819–832.

4. Белкин В. Н., Белкина Н. А., Антонова О. А. Инновационная активность менеджеров организаций в процессе модернизации российской экономики // Вестник Челябинского государственного университета. 2019. № 11(433). Экономические науки. Вып. 67. С. 124–131. DOI 10.24411/1994-2796-2019-11113

5. Волков С. А. Повышение инновационной активности и результативности человеческого капитала угольной компании: дис. … канд. экон. наук. Курск, 2019. 130 с.

6. Шмидт А. В., Костарев А. С. Концептуальные положения разработки стратегии инновационного развития угледобывающего производственного объединения в условиях смены технологических укладов // Вестник ЮУрГУ. Экономика и менеджмент. 2019. Том 15. № 4. С. 111–118.

7. Korkina T. A., Zakharov S. I., Golovanov E. V., Aliukov S. V. Development of organizational-economic relations as a condition of enterprise viability // Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference: Vision, 2020. P. 1662–1669.

8. Abukhait R., Pillai R. Discussion paper on the key motivational factors impacting innovative climate // International Journal of Business Innovation and Research. 2017. Vol. 13. No. 1. P. 92–111.

9. Галкина Н. В. Социально-экономическая адаптация угледобывающего предприятия к инновационной модели технологического развития. М.: Экономика, 2007. 248 с.

10. Коркина Т. А., Макарова В. А., Кучина Е. В. Развитие организационно-экономических отношений на горнодобывающих предприятиях. Челябинск: ЮУрГУ, 2017. 143 с.

11. Полещук М. Н. Оценка социально-трудовых отношений инновационных групп угледобывающего предприятия // ГИАБ. 2009. № 4. С. 398–403.

12. Килин А. Б., Костарев А. С., Азев В. А., Полещук М. Н. Конкордация персонала угледобывающего предприятия как фактор эффективности инновации // Организация и управление горным предприятием: ГИАБ. Отд. вып. 2014. № ОВ5. С. 32–47.

13. Костарев А. С. Стратегическое планирование инновационного развития угледобывающего производственного объединения. Москва: Экономика, 2019. 173 с.

Поступила в редакцию 2 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Костарев Андрей Сергеевич – кандидат экономических наук, заместитель генерального директора по экономике и финансам (финансовый директор) угледобывающего производственного объединения «СУЭК-Хакасия». E-mail: kostarevas@suek.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-90-98

Assessing personnel business relations in the process of innovative development at a coal mining production association

Andrei S. Kostarev[1]
[1] LLC SUEK-Khakasia, Chernogorsk, Republic of Khakassia, Russia

Abstract

Research relevance *is due to bad agreement between staff's ideas regarding the innovation process and some specific innovations need, content, and ways of implementation, which results in decreased effectiveness of innovative activity even if all necessary financial expenses have been covered.*

Research aim *is to develop the methods of assessing staff business relations at a coal mining production association in order to determine the ways of improving innovation efficiency.*

Research methodology *includes comparison, structural and functional analysis, questionnaires, and statistical analysis.*

Research results. *Business relations between the actors involved in innovative development are considered as a set of connections between them when initiating, developing, mastering and implementing the innovations regarding production resources distribution and use and reserves identification and implementation. For their assessment, the following criteria have been justified: the staff's focus on participation in innovative development and their coordination in the process of interaction. An assessment scale has been developed of employees' focus on innovative development, and indicators have been proposed to quantify the balance of business relations.*

Summary. *The application of the developed methodology for a retrospective analysis of business relations change at various stages of SUEK-Khakasia development made it possible to confirm its legitimacy, identify both positive and negative trends, and outline corrective measures.*

Key words: *innovation; innovative development strategy; coal mining production association; business relations.*

REFERENCES

1. Eiriz V., Faria A., Barbosa N. Firm growth and innovation: towards a typology of innovation strategy. *Innovation*. 2013; 15 (1): 97–111.

2. Iakovlev V. L. *Intra-production planning in the conditions of innovative development of a coal mining enterprise*. Chelyabinsk: ABRIS Publishing; 2019. (In Russ.)

3. Talke K., Salomo S., Kock A. Top management team diversity and strategic innovation orientation: The relationship and consequences for innovativeness and performance. *Journal of Product Innovation Management*. 2011; 28 (6): 819–832.

4. Belkin V. N., Belkina N. A., Antonova O. A. The manager's innovation role in the modernization of the russian economy. *Vestnik Cheliabinskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomicheskie nauki = Bulletin of Chelyabinsk State University. Economics*. 2019; 11 (433); 67: 124–131. (In Russ.)

5. Volkov S. A. *Increasing innovation activity and efficiency of the human capital of a coal company*. PhD (Econ) diss. Kursk; 2019. (In Russ.)

6. Schmidt A.V., Kostarev A. S. Conceptual provisions for innovation development strategy at coal-mining production association under conditions of changes in technological modes. *Vestnik IuUrGU. Ekonomika i menedzhment = Bulletin of SUSU. Series Economics and Management*. 2019; 15 (4): 111–118. (In Russ.)

7. Korkina T. A., Zakharov S. I., Golovanov E. V., Aliukov S. V. Development of organizational-economic relations as a condition of enterprise viability. *Proceedings of the 30th International Business Information Management Association Conference: Vision*. 2020. p. 1662–1669.

8. Abukhait R., Pillai R. Discussion paper on the key motivational factors impacting innovative climate. *International Journal of Business Innovation and Research*. 2017; 13 (1): 92–111.

9. Galkina N. V. *Socio-economic adaptation of a coal mining enterprise to an innovative model of technological development*. Moscow: Ekonomika Publishing; 2007. (In Russ.)

10. Korkina T. A., Makarova V. A., Kuchina E. V. *Development of organizational and economic relations at mining enterprises*. Chelyabinsk: SUSU, Publishing; 2017. (In Russ.)

11. Poleshchuk M. N. The estimation of social and manpower management of innovation groups at coal mining enterprises. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; 4: 398–403. (In Russ.)

12. Kilin A. B., Kostarev A. S., Azev V. A., Poleshchuk M. N. Concordance of personnel of a coal mine as the innovation efficiency factor. *Organizatsiia i upravlenie gornym predpriiatiem: Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Business and Organization of a Mining Company. Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; OV5: 32–47. (In Russ.)

13. Kostarev A. S. *Strategic planning of innovative: development of coal mining production association*. Moscow: Ekonomika Publishing; 2019. (In Russ.)

Received 2 March 2020

Information about authors:

Andrei S. Kostarev – PhD (Economics), Deputy General Director for economics and finance, Financial Director, LLC SUEK-Khakasia. E-mail: kostarevas@suek.ru

Для цитирования: Костарев А. С. Оценка организационно-экономических отношений персонала в процессе инновационного развития угледобывающего производственного объединения // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 90–98. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-90-98
For citation: Kostarev A. S. Assessing personnel business relations in the process of innovative development at a coal mining production association. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 90–98 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-90-98

УДК 622.68:622.69:622.273 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112

К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте

Юдин А. В.[1], Шестаков В. С.[1]*, Саитов В. И.[1], Абдулкаримов М. К.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: shestakov.v.s@mail.ru

Реферат

Введение. *Значительную долю затрат при разработке глубоких карьеров составляют затраты на перегрузку горной массы из «сборочного транспорта» на магистральный транспорт. Используются передвижные перегрузочные системы с бункерами, параметры которых определяются по нескольким методикам.*

Методология. *В настоящей работе при определении вместимости бункера переносных (передвижных) перегрузочных систем рассмотрено два подхода: детерминированный – системы транспорта работают в номинальном режиме; вероятностный – системы транспорта работают с присущей им неравномерностью. За основу рассмотренной методики принята геометрия бункера в конфигурации «перевернутого обелиска», как наиболее производительная система. Предложены формулы для расчета технологической и геометрической вместимости бункера. Предлагаемая методика расчета параметров учитывает: интенсивность прибытия сборочного (автомобильного) транспорта, которая описывается пуассоновским распределением; интенсивность поступления железнодорожного транспорта – распределением Эрланга. Приведено несколько числовых примеров, на которых показано практическое применение для определения параметров бункера.*

Результаты. *Обосновано значение требуемых дополнительных объемов бункера с целью компенсации неравномерности работы транспортных средств циклического действия в комплексах комбинированного транспорта.*

Ключевые слова: *комбинированный транспорт; перегрузочная система; бункер; интенсивность потока; распределение; вероятность; интервал; готовность.*

Введение. С увеличением глубины карьеров существенно возрастают затраты на транспорт, в связи с этим проводятся исследования по совершенствованию транспортных систем как в нашей стране [1–4], так и в других странах [5–8]. Некоторые исследователи предлагают снижать затраты за счет совершенствования бункерных устройств [9]. В условиях глубоких карьеров при применении переносных (передвижных) перегрузочных систем (ПС) основная роль бункерных устройств сводится к снижению затрат на комбинированный транспорт, обусловленных неравномерностью грузопотоков сопрягаемых видов транспорта. Повышение вместимости бункеров снижает простои транспорта. Установлено, что вместимость бункера переносных ПС должна определяться из условия часового режима наполнения и извлечения горной массы (ГМ) при использовании как автомобильно-конвейерного (АКТ), так и автомобильно-железнодорожного (АЖТ) транспорта. В условиях стационарных систем вместимость устройств может рассматриваться из условия сменных и даже суточных режимов наполнения и извлечения ГМ.

Методология проведения исследований. При определении вместимости бункеров переносных и передвижных ПС в карьерах следует рассматривать раз-

личные методические подходы при проектировании систем АКТ и АЖТ. При АКТ вместимость бункера в основном зависит от неравномерности работы подсистемы «сборочный транспорт» (СТ) как наименее стабильной. При АЖТ вместимость бункера зависит от неравномерности работы обеих подсистем СТ и магистрального транспорта (МТ). С учетом часового режима совместной работы сопрягаемых видов транспорта рационально рассматривать несколько случаев работы подсистем:

– обе подсистемы работают в номинальном режиме, с обеспечением условия $Q_{СТ} = Q_{МТ}$ (детерминированный подход);

– подсистемы СТ и МТ работают с присущей им неравномерностью (вероятностный подход), $Q_{СТ} \neq Q_{МТ}$, где $Q_{СТ}$, $Q_{МТ}$ – производительность подсистемы «сборочный транспорт» и магистрального транспорта.

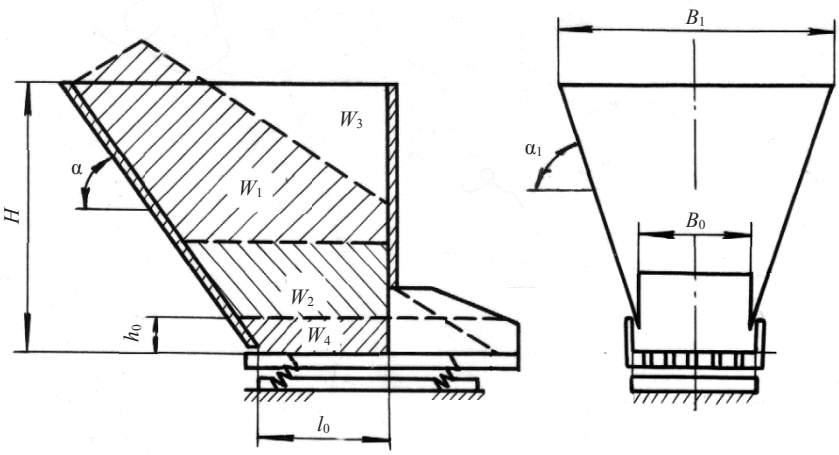


Рис. 1. Схема к определению вместимости бункера:
H, B_1 – высота и ширина верхней части бункера; l_0, B_0 – длина и ширина нижней части бункера; h_0 – высота защитного слоя; α и α_1 – углы наклона приемной и боковых стенок
Fig. 1. Bunker capacity determination scheme:
H, B_1 – height and width of the upper part of a bunker; l_0, B_0 – length and width of the lower part of a bunker; h_0 – height of the protective layer; α и α_1 – pitch angles of the side and receiving walls

Из множества технических решений бункеров, применяемых в технологических процессах горного производства, для ПС комбинированного транспорта рекомендуется принять форму бункера в виде «перевернутого обелиска» с одним, двумя совмещенными или разнесенными выпускными отверстиями. Экспериментально установлено, что при такой форме бункера обеспечивается: наибольшая производительность вибровыпуска взорванной горной массы; наименьший коэффициент проходимости; возможность ликвидации устойчивых сводов при зависании ГМ. Схема бункера в форме «перевернутого обелиска» приведена на рис. 1.

При известных параметрах геометрическая вместимость такого бункера может быть определена по одному из выражений:

$$W = \frac{H}{6}\left[\operatorname{ctg}\alpha(2B_1 + B_0) + 3l_0(B_1 + B_0)\right];$$
$$W = \frac{2}{3}\operatorname{ctg}\alpha\operatorname{ctg}\alpha_1 H^3 + (0{,}5B_0\operatorname{ctg}\alpha + l_0\operatorname{ctg}\alpha_1)H^2 + B_0 l_0 H. \quad (1)$$

Использование формул (1) затруднено, если неизвестен параметр бункера H, который при принятой конфигурации бункера может быть определен только по величине требуемой вместимости W.

Общий геометрический объем рассматриваемого бункера определяется в виде суммы объемов:

$$\begin{aligned} &\text{при детерминированном подходе } W = W_1 + W_3 + W_4; \\ &\text{при вероятностном подходе } W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \end{aligned} \quad (2)$$

где W_1 – объем, необходимый для размещения ГМ, обеспечивающий заданную производительность подсистем СТ и МТ; W_2 – дополнительный объем бункера, обусловленный неравномерностью работы сопрягаемых видов транспорта; W_3 – объем, характеризуемый геометрией бункера и коэффициентом его заполнения; W_4 – объем, необходимый для содержания предохранительного слоя ГМ на питателе.

При детерминированном подходе объем W_1 целесообразно определять из условия размещения ГМ, поступающей из средств СТ и отгружаемых средствами МТ за малый (минутный) промежуток времени. При сравнении показателей за искомый объем W_1 следует принять большую величину.

Как при АКТ, так и при АЖТ поступление ГМ в бункер обеспечивается средствами АТ. Установлено, что за малый промежуток времени можно принять возможное время обмена автосамосвалов около бункера $t_р$. Тогда минутное поступление ГМ в бункер рассчитывается по формуле

$$W_{1СТ} = \frac{q_а \psi_а Z}{t_р}, \quad (3)$$

где $q_а$ и $\psi_а$ – грузоподъемность и коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала; Z – количество мест разгрузки у бункера, обычно для ПС $Z \geq 2$, но в случае передвижных установок и при производительности системы до 1000 т/ч может быть равным единице.

При разгрузке ГМ из бункера средствами МТ минутное извлечение ГМ из бункера определяется по формулам:

для конвейерного транспорта

$$W_{1МТК} = \frac{Q_{КТ}}{60} K_с; \quad (4)$$

для железнодорожного транспорта

$$W_{1МТЖ} = \frac{q_д \psi_д n}{t_{пог}} K_t, \quad (5)$$

где $Q_{КТ}$ – часовая производительность забункерной системы; $q_д$ и $\psi_д$ – грузоподъемность и коэффициент использования думпкара; n – количество думпкаров в составе; K_t – коэффициент снижения производительности питателя; $t_{пог}$ – время погрузки состава; $K_с$ – коэффициент неравномерности забункерной системы.

При установившемся режиме работы ПС и при соблюдении номинальных интервалов прибытия транспортных средств СТ и МТ на разгрузку и загрузку достаточно в системе выдержать баланс производительностей подсистем $Q_{СТ} = Q_{МТ}$.

Незаполненный объем бункера W_3 зависит от формы бункера, количества мест разгрузки, физико-механических свойств ГМ. Объем W_3 примем в зависимости от общего геометрического объема:

$$W_3 = K_W W, \tag{6}$$

где K_W – коэффициент использования вместимости бункера, значение которого может быть принято равным 0,2–0,3. Меньшие значения коэффициента принимаются, если бункер имеет количество мест разгрузки более единицы.

Предохранительный объем W_4 принимают в зависимости от типа питателя, его установки, требуемой толщины защитного слоя h_0. По ГОСТу для горизонтальных питателей тяжелого типа рекомендуется высоту предохранительного слоя на полотне рабочего органа принимать равной 1,0–1,5 м. Расчеты показывают, что объем предохранительного слоя при его высоте, равной h_0, составляет не более 10 м^3, и его можно выразить в виде

$$W_4 = mq_{\text{а}}, \tag{7}$$

где m – постоянная, значение которой можно принимать 0,3–0,5 в зависимости от грузоподъемности самосвала.

Таким образом, в детерминированной постановке технологическая вместимость бункера определяется путем сопоставления показателей, определяемых выражениями (3)–(5), а геометрическая вместимость с учетом объемов W_3 и W_4 – по выражениям (6), (7).

Рассмотрим пример. Пусть ПС спроектирована на производительность Q = 2000 т/ч. Перегрузочная система включает бункер, оснащенный вибропитателями, установленными горизонтально. В качестве СТ приняты автосамосвалы БелАЗ-7555 грузоподъемностью 55 т. Производительность забункерной системы при конвейерном транспорте $Q_{\text{КТ}}$ с учетом коэффициента $K_{\text{с}}$ = 1,1 составляет 2200 т/ч. В случае железнодорожного МТ состав включает 10 думпкаров грузоподъемностью 105 т, время погрузки состава, с учетом обмена и маневров, $t_{\text{пог}}$ = 35 мин.

Расчетная интенсивность поступления А на разгрузку составляет 36 А/ч, расчетный интервал прибытия А – $t_{\text{п}}$ = 1,66 мин, время маневров и разгрузки А около бункера является ограничением и составляет $t_{\text{р}}$ = 2 мин. Так как $t_{\text{п}} < t_{\text{р}}$, то количество мест разгрузки около бункера $Z \geq 2$, а в бункер за интервал $t_{\text{р}}$ = 2 мин может поступить ГМ сразу из двух А. В соответствии с формулами (3)–(5), объемы W_1: $W_{1\text{СТ}}$ = 54 т/мин; $W_{1\text{МТК}}$ = 36,6 т/мин; $W_{1\text{МТЖ}}$ = 33 т/мин. В соответствии с формулами (6) и (7) при K_W = 0,25 и m = 0,4, $W_3 = 0{,}25W$; W_4 = 22 т. Таким образом, наибольший показатель объема составляет: $W_{1\text{СТ}}$ = 54 т/мин, его и принимаем для расчета геометрической вместимости бункера. Тогда общая вместимость, приведенная к одной минуте:

$$W' = \frac{q_{\text{а}}}{(1-K_W)}\left(\frac{\psi_{\text{а}} Z}{t_{\text{р}}} + m\right),$$

а приведенная к двум минутам (при одновременной разгрузке двух автомобилей):

$$W'' = \frac{q_{\text{а}}}{(1-K_W)}\left(\psi_{\text{а}} Z + m\right).$$

Для рассматриваемого примера $W' = 105$ т и $W'' = 181$ т.

На практике установлено, что процесс транспортирования ГМ средствами СТ и МТ носит вероятностный характер. Как правило, интенсивность поступления АТ на разгрузку описывается пуассоновским распределением, а интенсивность поступления ЖТ на погрузку – распределением Эрланга. Наиболее стабильной является подсистема МТ при конвейерном транспорте. Учитывая сказанное, выдержать баланс $Q_{\text{СТ}} = Q_{\text{МТ}}$ весьма трудно. При оценке вместимости бункера необходимо вносить поправки, связанные с неравномерностью поступления ГМ в бункер и отгрузки ГМ из бункера. Объем W_2 в соответствии с формулой (2) отражает вероятностный характер взаимодействия подсистем СТ, ПС, МТ.

Объем W_2 следует оценивать с двух позиций: со стороны работы СТ и со стороны работы МТ. Из сравниваемых величин следует принять наибольшую.

Рассмотрим работу СТ. Из рассматриваемых подсистем сборочный АТ является наименее стабильной подсистемой по своим характеристикам, большая часть которых имеет вероятностную основу. Установлено, что поток АТ к ПС можно считать простейшим, он обладает свойствами ординарности, а в установившийся период (70–80 % продолжительности смены) также свойствами стационарности и отсутствия последствия. Интенсивность поступления потока АТ к ПС описывается пуассоновским распределением. Для простейшего потока вероятность того, что за отрезок времени t на ПС поступит K автосамосвалов:

$$P_K(t) = \frac{(\lambda t)^K}{K!}\exp(-\lambda t) \tag{8}$$

и, в частности, что не поступит ни одного А:

$$P_0(t) = \exp(-\lambda t),$$

где λ – средняя интенсивность потока, измеряемая числом А в единицу времени; $\lambda t = a$ – математическое ожидание интенсивности потока А на разгрузку, А/мин.

Важная характеристика потока при определении вместимости бункера – закон распределения длины промежутка между соседними А. Рассмотрим случайную величину T – промежуток времени между двумя произвольными поступлениями соседних А в простейшем потоке. Так как простейший поток не обладает последействием, то поступление на разгрузку одного А не влияет на поступление других А в дальнейшем. Поэтому вероятность того, что интервал между А будет не меньше или не больше величины $t_{\text{п}}$ определяется как [10]

$$\begin{gathered} P(T \geq t_{\text{п}}) = \exp(-\lambda t); \\ P(T < t_{\text{п}}) = F(t) = 1 - \exp(-\lambda t), \qquad t_{\text{п}} > 0. \end{gathered} \tag{9}$$

Вероятность прибытия А для разгрузки на ПС определим на примере ПС со следующими параметрами: $Q_{\text{СТ}} = 1000$ т/ч; грузоподъемность автосамосвалов $q_{\text{а}} = 30$ и 40 т; средняя интенсивность потока $\lambda = 29$ А/ч или 0,48 А/мин; время поступления А на разгрузку составляет $t_{\text{п}} = 2{,}0$ и 2,5 мин; количество мест разгрузки у бункера $Z = 1$.

Расчеты показали, что при интервалах поступления автосамосвалов $t_{\text{п}} = 2{,}0$ и 2,5 мин математическое ожидание распределения составит $a = 0{,}96$ и 1,2 А/мин, а вероятность того (формула (8)), что на разгрузку не прибудет ни одного А со-

ставит 0,618 и 0,699, прибудет один А – 0,26 и 0,34, прибудет два автосамосвала – 0,08 и 0,14, прибудет три автосамосвала – 0,03 и 0,06. Рассмотрим, как сделанное заключение отразится на результате расчета общей вместимости бункера. Очевидно, что со средней вероятностью 0,6 к бункеру не поступит объем ГМ (W_2), обеспечивающий работу магистрального транспорта. Например, при АКТ объем $W_2 = 0{,}6W_{1\text{МТК}}$. Такой объем должен быть в бункере предусмотрен заранее как дополнительный. В этом случае формула для определения общей геометрической вместимости бункера запишется в виде

$$W = W' + W_2 = \frac{q_{\text{а}}}{(1 - K_W)}(\psi_{\text{а}} Z K_{\text{з}} + m) + 0{,}6W_{1\text{МТ}}. \qquad (10)$$

В рассматриваемом примере при $W_{1\text{МТ}}$ = 1000/60 = 16,6 т/мин и при $Z = 1$ дополнительный объем W_2 составит 10 т, а общая вместимость бункера по формуле (10) – 80 т. При $Z = 2$ значение W составит 130 т.

Таблица 1. Изменение вероятностей интервалов прибытия автосамосвалов на разгрузку
Table 1. Changing the probabilities of frequency for dump trucks arrival for unloading

Исходные условия	Значение $t_{\text{п}} \pm \Delta t_{\text{п}}$					
	$1{,}2t_{\text{п}}$	$1{,}4t_{\text{п}}$	$1{,}6t_{\text{п}}$	$0{,}8t_{\text{п}}$	$0{,}6t_{\text{п}}$	$0{,}4t_{\text{п}}$
$a = 0{,}96$; $t_{\text{п}} = 2$ мин	2,4	2,8	3,2	1,6	1,2	0,8
$P(T > t_{\text{п}})$	**0,100**	0,068	0,046	0,216	0,316	**0,467**
$P(T < t_{\text{п}})$	0,900	0,932	**0,954**	**0,784**	0,684	0,533
$a = 1{,}2$; $t_{\text{п}} = 2{,}5$ мин	3,6	4,3	4,8	2,4	1,92	1,2
$P(T > t_{\text{п}})$	**0,027**	0,010	0,008	0,090	0,146	**0,301**
$P(T < t_{\text{п}})$	0,973	0,990	**0,992**	**0,910**	0,854	0,699

Для рассматриваемого примера результаты расчета вероятностей интервала прибытия автосамосвалов (формулы (9)) приведены в табл. 1 при условии вариации времени прибытия $t_{\text{п}}$ на ±20 %, ±40 %, ±60 %. В таблице выделены наиболее вероятные интервалы прибытия А на разгрузку. Можно констатировать, что интервал прибытия А на разгрузку с вероятностью 0,99–0,95 не превысит величину $1{,}6t_{\text{п}}$ при положительных значениях Δt. Таким образом, время прибытия А на разгрузку лежит в диапазоне $(0{,}8–1{,}6)t_{\text{п}}$ или $t'_{\text{п}}$ = (1,6–3,2) мин и $t'_{\text{п}}$ = (2,4–4,8) мин для второго случая.

По изменившимся условиям интервала прибытия А на разгрузку определим необходимый объем бункера W_2:

$$W'_2 = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} t_{\text{п}\min}; \qquad W''_2 = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60} t_{\text{п}\max}. \qquad (11)$$

Для рассматриваемого примера W'_2 = 26,6 т; W''_2 = 53,3 т. Очевидно, что с увеличением интервала прибытия А до величины $t_{\text{п max}}$ в бункер не будет загружен объем W''_2. При требовании непрерывности процесса этот объем должен быть предусмотрен заранее при проектировании технологической вместимости бункера. В то же время при снижении интервала прибытия А до величины $t_{\text{п min}}$ в бункер поступит дополнительный объем ГМ (W'_2), а это означает, что в бункере так-

же должна быть заранее предусмотрена вместимость для размещения объема W_2'. Условия по выражению (11) несовместимы. Поэтому в дальнейшем из двух значений W_2' и W_2'' выбираем наибольшее значение W_2''. При данном подходе значение общей геометрической вместимости бункера по выражению (10) составит 113 т при $Z = 1$.

Таким образом, для рассматриваемого примера при учете неравномерности работы СТ общая вместимость бункера увеличивается на 10–50 т при $Z = 1$.

Возьмем другой подход при определении интервала прибытия автосамосвалов к месту разгрузки.

Если принято, что поток прибывающих на разгрузку А следует закону Пуассона, то время между двумя соседними автосамосвалами распределяется по показательному закону [11]:

$$f(t) = \lambda \exp(-\lambda t),$$

где λ – интенсивность движения автомобилей.

Таблица 2. Интервалы времени между двумя соседними автосамосвалами
Table 2. Time interval between two neighbouring dump trucks

Номер реализации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$0 \le y_i \le 1$	0,41	0,21	0,85	0,18	0,65	0,36	0,72	0,55	0,29	0,63
$t_i = -\frac{1}{\lambda}\ln y_i$, мин	1,86	3,27	0,33	3,54	0,85	2,10	0,66	1,18	2,51	0,95

Для получения алгоритма при моделировании случайных величин, распределенных по показательному закону, необходимо интегральную функцию закона выразить явно относительно аргумента:

$$y = F(t) = \int_0^t \lambda \exp(-\lambda t)dt = 1 - \exp(-\lambda t), \tag{12}$$

откуда $t_i = -\frac{1}{\lambda}\ln y_i;\ 0 \le y_i \le 1.$

Для рассматриваемого в примере случая ПС с производительностью $Q_{\text{СТ}}$ = 1000 т/ч интенсивность движения составляет λ = 29 А/ч или 0,008 А/с. Для моделирования интервала времени между двумя соседними автосамосвалами следует воспользоваться случайными числами. Результаты расчета по выражению (12) для различных случайных чисел приведены в табл. 2.

По результатам можно сделать заключение, что отклонения интервалов движения между соседними автосамосвалами от заданного расчетного значения $t_{\text{п}} = 2$ мин составят: в сторону снижения интервала $\Delta t''$ в среднем на 40 %, в сторону повышения $\Delta t'$ в среднем на 48 %. Таким образом, время прибытия лежит в диапазоне $\Delta t' = (1{,}2–2{,}96)$ мин, что практически совпадает с выводами, сделанными ранее.

Приведем результаты промышленных исследований ПС при АКТ на Ингулецком ГОКе [13] производительностью 3500 т/ч. При $Z = 4$ значение λ = 1,203 А/мин, а математическое ожидание интенсивности поступления А к бункеру ПС a = 1,21 А/мин. В вероятной форме интенсивность поступления АТ к ПС можно записать следующим образом: частость прибытия одного автосамосвала – 32 %,

двух автосамосвалов – 25 %, трех – 10 %, четырех – 3,5 %, ни одного – 28 %. Таким образом, в течение часового интервала около 40 % времени на перегрузку одновременно прибывают более двух автосамосвалов, а в течение 28 % – ни одного автосамосвала. Как то, так и другое состояние системы должно быть скомпенсировано достаточной вместимостью бункера. В первом случае бункер должен принять сразу 2, 3 вместимости кузова автосамосвала, во втором случае в бункере должно быть размещено достаточное количество ГМ, чтобы обеспечить бесперебойную работу подсистемы магистрального транспорта. Таким образом, количество мест разгрузки в выражении (3) следует принимать не менее двух, а для компенсации отсутствия автосамосвалов в бункере всегда должен находиться объем горной массы, обеспечивающий работу подсистемы КТ за время между требуемым прибытием автосамосвалов с учетом амплитуды колебаний интервала прибытия Δt.

Рассмотрим работу магистрального транспорта. Непрерывную работу КТ можно обеспечить лишь в том случае, если каждая последующая порция ГМ в автосамосвалах будет подходить к месту разгрузки и разгружаться после предыдущей не позднее, чем через интервал времени $t_{\text{ПКТ}}$ по условиям конвейерного МТ:

$$t_{\text{ПМТ}} = \frac{60 q_{\text{а}} \psi_{\text{а}}}{Q_{\text{МТК}}},$$

а с учетом неравномерности работы СТ расчетный интервал $t_{\text{ПМТ}}$ должен быть увеличен введением поправки $\Delta t'_{\text{ПМТ}} = t'_{\text{п}} = (2–4)\, t_{\text{п}}$ (см. ранее). Для рассматриваемой ПС на Ингулецком ГОКе при $Q_{\text{МТК}} = 3500$ т/ч и при применении автосамосвалов грузоподъемностью 75 т, величина $t_{\text{ПМТ}}$ составляет 1,12 мин, а дополнительный объем $W_{2\text{МТ}}$ по условиям магистрального конвейерного транспорта 115–230 т.

В то же время условия работы МТ зависят от коэффициента равномерности выпуска ГМ из бункера $K_{\text{р}}$, от коэффициента готовности $K_{\text{г}}$, от рабочей вероятности бункерной системы $P_{\text{р}}$. Значение коэффициента $K_{\text{р}}$ зависит от типа питателя, фракционного состава взорванной ГМ и размеров выпускных отверстий бункера.

Коэффициент готовности забункерной системы при конвейерном транспорте характеризует вероятность того, что система будет работоспособной в произвольно выбранный момент времени и определяется по формуле

$$K_{\text{г}} = \frac{T_{\text{н}}}{T_{\text{н}} + T_{\text{в}}},$$

где $T_{\text{н}}$ и $T_{\text{в}}$ – наработка на отказ системы, характеризующая среднее время работы системы между отказами и среднее время восстановления (устранения одного отказа системы).

Коэффициент готовности системы КТ, состоящий из n последовательно соединенных восстанавливаемых конвейеров с интенсивностью отказов λ и интенсивностью восстановления μ определяется по формуле [12]

$$K_{\text{г}} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; \qquad K_{\text{гМТ}} = \frac{1}{1 + \sum\limits_{1}^{n} \frac{1 - K_{\text{г}i}}{K_{\text{г}i}}},$$

где $K_{\text{г}i}$ – коэффициент готовности i-го конвейера.

Из опыта работы отечественных и зарубежных транспортных систем можно сделать заключение: для ленточных конвейеров при перемещении крупнодробленых скальных и рыхлых вскрышных пород без скальных включений $K_г$ = 0,96–0,97; при перемещении рыхлых вскрышных пород, склонных к налипанию и намерзанию, со скальными включениями $K_г$ = 0,90–0,92; для ПС между конвейерами $K_г$ = 0,98; для ПС с дробилками $K_г$ = 0,92–0,95.

Производительность (часовая) КТ при годовом объеме перевозок $Q_г$ определяется по формуле

$$Q_{МТК} = \frac{Q_г}{TK_г},$$

где T – годовое время работы КТ.

С учетом неравномерности выпуска ГМ из бункера и состояния бункерной системы при известной $Q_{МТК}$, минутный грузопоток системы определяется по формуле

$$W_{МТК} = \frac{Q_{МТК}}{60} P_р K_р.$$

Произведение $P_р K_р$ ориентировочно составляет величину $K_с$ = 0,9–0,95, что в определенные промежутки времени снижает минутный и часовой грузопотоки и общее время работы МТ ($t_{МТК}$) на 5–10 %. Фактическое время работы МТ составляет (0,90–0,95)$t_{МТК}$, а время отсутствия извлечения ГМ из бункера $\Delta t_к$ = (0,05–0,1)$t_{МТК}$, что и определяет требуемую дополнительную вместимость бункера $W_{2МТК}$, связанную с неравномерностью работы МТ:

$$W_{2МТК} = \frac{Q_{МТК}}{60} \Delta t_к.$$

Неизвлеченный объем ГМ ($W_{2МТК}$) оказывает влияние на общую вместимость бункера. Чтобы обеспечить бесперебойную работу СТ, в бункере должен быть предусмотрен заранее дополнительный объем. С учетом сказанного, общая вместимость бункера при АКТ

$$W = W' + W_2 = \frac{q_а}{(1 - K_W)}(\psi_а Z + m) + \frac{Q_{МТК}}{60} \Delta t_к. \quad (13)$$

При производительности системы $Q_{МТК}$ = 2000 т/ч, при Z = 2 и при грузоподъемности АТ $q_а$ = 55 т общая геометрическая вместимость бункера в соответствии с выражением (13) составит 310 т.

В наихудшем случае работы системы, когда одновременно наблюдается неравномерность извлечения ГМ средствами МТ и неравномерность поступления ГМ средствами СТ, общая вместимость бункера должна рассчитываться с учетом обоих состояний:

$$W = \frac{q_а}{(1 - K_W)}(\psi_а Z + m) + \frac{Q_{МТК}}{60} \Delta t_к + \frac{Q_{СТ}}{60} t'_п.$$

Рассмотрим влияние неравномерности прибытия и изменение времени погрузки состава на величину вместимости бункера W_2 при магистральном ЖТ.

Проведем оценку ПС только при номинальном часовом режиме работы СТ и МТ. Сменные колебания и неравномерность работы в межсменные промежутки не рассматриваются.

Известно, что время погрузки состава грузоподъемностью 1000 т при экскаваторной погрузке составляет до 60 мин при производительности ПС, равной 1000 т/ч. Эстакадно-бункерные ПС, оснащенные вибропитателями, способны повысить производительность ПС до 2000 т/ч при времени погрузки и смены состава $t_{\text{пог}}$ = 30–36 мин (в зависимости от исполнения ПС и организации работ при погрузке). В то же время при организации работы магистрального ЖТ представляет трудность обеспечение постоянства времени $t_{\text{пог}}$. Наибольшее влияние на вместимость бункера W_2 оказывает неравномерность прибытия ЖТ с задержкой, характеризуемой величиной $+\Delta t_{\text{пог}}$. Такая задержка оказывает значительное влияние на работу сборочного АТ.

При известной вместимости состава $q_g\ n$ и заданной часовой производительности подсистемы МТ ($Q_{\text{МТЖ}}$) требуемое значение продолжительности погрузки и обмена составов на ПС определяется по формуле:

$$t_{\text{пог}} = \frac{60 q_g n \psi_g}{Q_{\text{МТЖ}}} \approx \frac{60 q_g n \psi_g}{Q_{\text{п}} K_t}, \tag{14}$$

где q_g и ψ_g – грузоподъемность и коэффициент использования грузоподъемности думпкара; n – количество думпкаров в составе; $Q_{\text{п}}$ – производительность питателя; K_t – коэффициент снижения производительности ПС из-за способа погрузки состава.

Средняя интенсивность (интервал) подачи составов на погрузку в течение одного часа

$$\lambda_{\text{с}} = \frac{60}{t_{\text{пог}}}. \tag{15}$$

Фактический интервал поступления локомотивосоставов на погрузку $t_{\text{ф пог}}$ отличается от среднего значения. Установлено, что интервал поступления составов к ПС на погрузку (время их погрузки) достаточно близко описывается распределением Эрланга второго и третьего порядков. Выражение плотности распределения записывается в виде [10]

$$f_K(t) = \frac{(\lambda_K K)^K}{(K-1)!}\ t^{K-1} \exp(-K\lambda) K^t,$$

где λ_K – плотность потока Эрланга при порядке распределения K определяется как $\lambda_K = \lambda/K$; λ – плотность потока (число составов, поступающих в единицу времени) пуассоновского потока.

Выражение для функции распределения Эрланга имеет вид

$$F(t) = \int_0^t \frac{(\lambda K)^K}{(K-1)!} t^{K-1} \exp(-K\lambda t). \tag{16}$$

В зависимости от порядка K интеграл (16) выражается по-разному через элементарные функции. Приведем несколько примеров функции распределения

Эрланга порядков K, наиболее распространенных в эксплуатации железных дорог [10]:

$$\begin{matrix} K=1 \\ K=2 \\ K=3 \\ K=4 \end{matrix} \begin{cases} F(t)=1-\exp(-\lambda t); \\ F(t)=1-(1+2\lambda t)\exp(-2\lambda t); \\ F(t)=1-\dfrac{1}{2}(9\lambda^2 t^2+6\lambda t+2)\exp(-3\lambda t); \\ F(t)=1-\dfrac{1}{3}(\lambda^3 t^3+24\lambda^2 t^2+12\lambda t+3)\exp(-4\lambda t). \end{cases}$$

Составляющая вместимости бункера W_2, зависящая от изменения объемов отгрузки ГМ из бункера, должна определяться с учетом неравномерности прибытия составов на загрузку и изменчивости интервалов прибытия, загрузки и обмена составов:

$$t_{\text{ф пог}} = t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}.$$

При известной средней часовой интенсивности прибытия составов на погрузку λ_c по выражению (15), задаваясь амплитудами отклонения времени прибытия составов на погрузку $+\Delta t_{\text{пог}}$ и значениями интервалов между прибытием двух соседних составов, применив свойства распределения Эрланга, можно определить вероятности того, что время прибытия составов не превысит принятую величину амплитуды отклонения $\Delta t_{\text{пог}}$ и вероятность прибытия двух соседних составов на ПС.

В табл. 3 приведены результаты расчета вероятностей для системы с параметром распределения Эрланга $K = 2$. При вместимости состава 1000 т горной массы производительность $Q_{\text{МТЖ}} = 2000$ т/ч обеспечивается лишь при $t_{\text{пог}} \leq 30$ мин, при этом производительность загрузочного устройства в бункере (по формуле (14)) должна быть не менее 2200 т/ч. Любое повышение $t_{\text{пог}}$ при сохранении вместимости состава снижает производительность $Q_{\text{МТЖ}}$.

По результатам расчетов можно сделать заключение.

Во-первых, при расчетном времени обмена и погрузки состава $t_{\text{пог}} = 30$ мин, обеспечивающем производительность подсистемы МТ $Q_{\text{МТЖ}} = 2000$ т/ч, вероятность того, что параметр $t_{\text{пог}}$ определен с отклонением 15 мин, составляет не менее 0,8. Это означает, что с большой степенью вероятности в течение 15 мин выпуск ГМ из бункера производиться не будет.

Во-вторых, чтобы обеспечить непрерывность работы всей системы, и СТ в частности, необходимо в бункере предусмотреть дополнительную вместимость, компенсирующую задержку работы МТ. В рассматриваемом примере этот объем составит до 500 т горной массы, при производительности $Q_{\text{МТЖ}} = 1000$ т/ч – 250 т.

В-третьих, при параметре $t_{\text{пог}} = 30$ мин с вероятностью 0,804 интервал между прибытиями составов не превысит 45 мин, с вероятностью 0,595 – 30 мин, с вероятностью 0,209 – 30–45 мин.

Таким образом, для учета влияния неравномерности работы магистрального железнодорожного транспорта на вместимость бункера ПС можно принять 15-минутный интервал параметра $\Delta t_{\text{пог}}$ при вероятности события 0,81. При принятии параметра $t_{\text{пог}} = 10$ и 5 мин вероятность события соответственно составит 0,74 и 0,67.

Условимся, что работа ПС проходит в установившемся режиме при производительности системы 2000 т/ч, и при обеспечении заданного времени погрузки и обмена составов $t_{\text{пог}} = 30$ мин. В расчетном режиме минутное поступление ГМ

средствами СТ соответствует выражению (3), а минутное извлечение ГМ из бункера и поступление ее в средства МТ соответствует выражениям (4) и (5), а объемы поступления ГМ в бункер и извлечения из бункера удовлетворяют требованиям баланса системы. Баланс нарушается, если $t_{\text{ф пог}} \neq t_{\text{пог}}$ и $t_{\text{ф пог}} = t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}$.

При принятом параметре $t_{\text{пог}}$ из бункера не будет извлечено 500, 330 и 160 т горной массы соответственно, а сборочный транспорт продолжает работать в расчетном режиме. За время $t_{\text{пог}}$ автомобильным транспортом в бункер будет загружено

$$W_{2\text{МТЖ}} = W_{2\text{СТ}} = \frac{Q_{\text{СТ}}}{60}\Delta t_{\text{пог}},$$

а в бункере заранее должна быть предусмотрена вместимость для размещения объема $W_{2\text{СТ}}$.

Таблица 3. Показатели вероятностных состояний
Table 3. Probability states indicators

Задаваемые и определяемые параметры	Значения					
Среднее время обмена и погрузки составов $t_{\text{пог}}$, мин	30			40		
Расчетная производительность подсистемы магистрального транспорта $Q_{\text{МТЖ}}$, т/ч	2000			1500		
Интенсивность погрузки составов, приведенная к 1 мин	0,033			0,025		
Заданная амплитуда отклонений времени погрузки состава $+\Delta t_{\text{пог}}$, мин	+5	+10	+15	+5	+10	+15
Вероятность того, что время погрузки состава не превысит $t_{\text{пог}} + \Delta t_{\text{пог}}$	0,67	0,74	0,81	0,66	0,73	0,76
Средняя интенсивность прибытия составов на погрузку за 1 час	2,0			1,5		
Расчетный интервал времени прибытия составов на погрузку, мин	30–45			40–55		
Вероятность того, что интервал между прибытиями двух составов находится в расчетном диапазоне	0,209			0,201		

С учетом неравномерности работы МТ и СТ и в часовом режиме общая вместимость бункера при комбинированном АЖТ

$$W = W' + W_2 = \frac{q_{\text{а}}}{(1 - K_W)}(\psi_{\text{а}} Z K_{\text{з}} + m) + \frac{Q_{\text{СТ}}}{60}(t_{\text{п}} + \Delta t_{\text{пог}}).$$

При производительности системы 2000 т/ч и при $Z = 2$ общая вместимость бункера составит около 750 т горной массы.

Заключение. Рассмотрены два подхода (детерминированный и вероятностный) при расчете вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте в карьерах. Показано, что при взаимодействии сборочного (автомобильного) транспорта и магистрального (железнодорожного) технологическая вместимость бункера должна предусматривать дополнительные объемы для размещения ГМ, обусловленные вероятностным характером интенсивности распределения и прибытия транспортных средств циклического действия к перегрузочной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Молдабаев С. К., Абен Е., Касымбаев Е. А., Сарыбаев Н. О. Комплектация комплексов циклично-поточной технологии при комбинированном автомобильно-железнодорожном виде транспорта // ГИАБ. 2019. № 7. С. 158–173.
2. Свиридов Л. Т., Кочегаров А. В., Арутюнян С. С. К обоснованию конструкции и параметров загрузочного бункера с питателем // Химико-лесной комплекс. Научное и кадровое обеспечение в XXI веке. Проблемы и решения: сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2000. С. 104–106.
3. Кармаев Г. Д., Тюлькин А. П., Сумина И. Г. К вопросу размещения дробильно-перегрузочных пунктов комплексов ЦПТ по глубине карьеров // ГИАБ. 2009. № 10. С. 364–372.
4. Яковлев В. Л., Яковлев В. А. Актуальные проблемы карьерного транспорта и перспективы его развития // Проблемы недропользования. 2017. № 4(15). С. 5–9.
5. Nel S., Kizil M. S. and Knights P. Improving truck-shovel matching. In: Baafi E. Y., Kinimonth R. J. and Porter I. Proceedings of the 35th APCOM Symposium. 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia. 24–30 September 2011. P. 381–391.
6. Korolenko M. K., Perehudov V. V., Fedin K. A., Romanenko A. V., and Protasov V. P. The improvement of shovel and truck methods for rock hoisting in the context of Yuzhny GOK OJSC: monograph. KryvyRih: Dionis, 2012.
7. Isaac Dzakpata, Peter Knights, Mehmet Siddik Kizil et al. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time // Coal Operators' Conference. Australia: University of Wolloongong, 2016. P. 463–476.
8. Bozorgebrahimi E. The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining. University of British Columbia, 2004.
9. Юдин А. В., Попов А. Г., Шестаков В. С. Бункерные системы комплексов комбинированного транспорта в карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 2. С. 128–139.
10. Акулиничев В. М., Кудрявцев В. А., Корешков А. Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 222 с.
11. Завадский Ю. В. Решение задач автомобильного транспорта методом имитационного моделирования. М.: Транспорт, 1977. 72 с.
12. Васильев М. В., Волотковский В. С., Кармаев Г. Д. Конвейеры большой протяженности на открытых работах. М.: Недра, 1977. 246 с.
13. Смирнов В. П., Лель Ю. И. Теория карьерного большегрузного автотранспорта. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 285 с.

Поступила в редакцию 7 апреля 2020 года

Сведения об авторах:

Юдин Аркадий Васильевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: gpt2004@mail.ru
Шестаков Виктор Степанович – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru
Саитов Виль Ирхужеевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: tit.ural@mail.ru
Абдулкаримов Магомед Казбекович – старший преподаватель кафедры горных машин и комплексов Уральского государственного горного университета. E-mail: abdmg@list.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112

Determining the capacity of a bunker as a part of the handling system with combined transport

Arkadii V. Iudin[1], Viktor S. Shestakov[1], Vil I. Saitov[1], Magomed K. Abdulkarimov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Significant share of the costs for deep quarries is the cost of rock mass reloading from the "assembly transport" to the main transport make up a considerable proportion in open pit development costs. Portable handling systems with bunkers are used, the parameters of which are determined by several methods.*
Methodology. *In this work, when determining the capacity of the bunker, two approaches have been considered: deterministic – transport systems operate at nominal conditions; probabilistic – transport systems operate with their inherent unevenness. The methodology adopted is based on the geometry of the bunker in the configuration of the "inverted obelisk", as the most productive system. Formulas to calculate the technological and geometric capacity of the bunker have been proposed. The proposed method parameters design takes into account assembly (automobile) transport arrival rate, which is described by the Poisson distribution and railway transport arrival rate described by the distribution of Erlang. Several numerical examples reveal practical application for bunker parameters determination.*

Results. *The significance of the required additional bunker volumes has been justified in order to make up for cyclic transport vehicles irregular operation within combined transport complexes.*

Key words: *combined transport; handling system; bunker; flow rate; distribution; probability; interval; availability.*

REFERENCES

1. Moldabaev S. K., Aben E., Kasymbaev E. A., Sarybaev N. O. Complete sets of cyclic-flow technology with combined road-rail transport. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2019; 7: 158–173. (In Russ.)

2. Sviridov L. T., Kochegarov A. V., Arutiunian S. S. To the rationale of the structure and parameters of a loading bunker with a feeder. In: *Chemical and timber complex. Problems and solutions: proceedings of Internat. sci.-pract. conf.* Krasnoyarsk; 2000. (In Russ.)

3. Karmaev G. D., Tiulkin A. P., Sumina I. G. Regarding the issue of accommodating the crushing-handling stations of cyclical and continuous complexes according to the depth of an open pit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2009; 10: 364–372. (In Russ.)

4. Iakovlev V. L., Iakovlev V. A. Actual problems of pit transport and its development prospects. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2017; 4(15): 5–9. (In Russ.)

5. Nel S., Kizil M. S. and Knights P. Improving truck-shovel matching. In: Baafi E. Y., Kinimonth R. J. and Porter I. *Proceedings of the 35th APCOM Symposium. 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia. 24–30 September 2011*. P. 381–391.

6. Korolenko M. K., Perehudov V. V., Fedin K. A., Romanenko A. V., and Protasov V. P. *The improvement of shovel and truck methods for rock hoisting in the context of Yuzhny GOK OJSC: monograph*. KryvyRih: Dionis, 2012.

7. Isaac Dzakpata, Peter Knights, Mehmet Siddik Kizil et al. Truck and shovel versus in-pit conveyors systems: a comparison of the valuable operating time. *Coal Operators' Conference*. Australia: University of Wolloongong, 2016. P. 463–476.

8. Bozorgebrahimi E. *The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining*. University of British Columbia, 2004.

9. Iudin A. V., Popov A. G., Shestakov V. S. Bunker systems of combined open-pit transport complexes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 2: 128–139. (In Russ.)

10. Akulinichev V. M., Kudriavtsev V. A., Koreshkov A. N. *Mathematical methods in rail ways operation*. Moscow: Transport Publishing; 1981. (In Russ.)

11. Zavadskii Iu. V. *Solving the problems of automobile transport by the method of simulation modeling*. Moscow: Transport Publishing; 1977. (In Russ.)

12. Vasiliev M. V., Volotkovskii V. S., Karmaev G. D. *Long conveyers at opencast operations*. Moscow: Nedra Publishing; 1977. (In Russ.)

13. Smirnov V. P., Lel Iu. I. *The theory of open pit heavy motor transport*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2002. (In Russ.)

Received 7 April 2020

Information about authors:

Arkadii V. Iudin – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: gpt2004@mail.ru
Viktor S. Shestakov – PhD (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: shestakov.v.s@mail.ru
Vil I. Saitov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: tit.ural@mail.ru
Magomed K. Abdulkarimov – senior lecturer, Department of Mining Machines and Complexes, Ural State Mining University. E-mail: abdmg@list.ru

Для цитирования: Юдин А. В., Шестаков В. С., Саитов В. И., Абдулкаримов М. К. К определению вместимости бункера в составе перегрузочной системы при комбинированном транспорте // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 99–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112
For citation: Iudin A. V., Shestakov V. S., Saitov V. I., Abdulkarimov M. K. Determining the capacity of a bunker as a part of the handling system with combined transport. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 99–112 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-99-112

УДК 622.235 (043.3) DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-113-121

Разработка способов управления пылегазовым режимом при взрывании высоких уступов в глубоких карьерах

Заиров Ш. Ш.[1]*, Худайбердиев О. Ж.[1], Норматова М. Ж.[1], Номдоров Р. У.[2]
[1] Навоийский государственный горный институт, г. Навои, Республика Узбекистан
[2] Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Республика Узбекистан
e-mail: sher-z@mail.ru

Реферат

Цель работы *– разработка способа снижения концентрации пылегазовых выбросов, выделяемых при массовых взрывах на карьерах.*

Актуальность исследований. *При ведении горных работ на карьерах буровзрывным способом выделяется огромное количество пыли и ядовитых газообразных продуктов, на интенсивность образования которых влияют метод взрывания, ассортимент используемых взрывчатых веществ (ВВ), метод бурения взрывных скважин, тип и вид забойки, обводненность массива, свойства горных пород, метеоусловия и др. Установлено, что при взрыве 1 кг ВВ из образуемых в среднем 900 л различных газов и газообразных продуктов 15 % являются ядовитыми и опасными для человека и окружающей среды. Для предотвращения пылегазовыделений в настоящее время применяют различные типы забоек, которые оказывают влияние не только на уменьшение объема выбросов, но и на эффективность и безопасность взрывных работ, что способствует наиболее полному использованию энергии взрыва и увеличивает время воздействия продуктов взрывчатого превращения. Несмотря на значительный объем проведенных исследований и достигнутые успехи в этом направлении, для глубоких карьеров необходимо определить рациональные параметры забойки в скважинных зарядах ВВ, уменьшить образование ядовитых газов, выделяемых при массовых взрывах, разработать методику получения поглотительного раствора, способного нейтрализовать ядовитые соединения после взрыва, и разработать эффективный способ снижения пылегазовыделений при массовых взрывах.*

Методика проведения исследований. *При решении поставленной задачи использованы комплексные методы исследований, включающие теоретические обобщения и экспериментальные исследования в лабораторных, полигонных и промышленных условиях, методы математического моделирования параметров забойки в скважинных зарядах ВВ, методы математического программирования с использованием современной компьютерной техники, а также методы математической статистики и корреляционного анализа результатов исследований.*

Результаты. *Определено изменение давления продуктов детонации в скважине с учетом процессов движения забойки из песка и поглощающей смеси различной длины. Установлено, что при использовании забойки из поглощающей смеси давление продуктов детонации и время вылета выше по сравнению с забойкой из песка. Установлена эффективная длина забойки в скважинных зарядах ВВ в зависимости от времени спада давления в скважине и длины забойки в различных сечениях скважины. Математическим моделированием параметров забойки при взрыве скважинных зарядов ВВ установлено изменение давления во взрывной полости от времени и длины забойки при ее вылете из скважины, а также продолжительность процесса вылета забойки и истечения продуктов детонации при взрыве ЭВВ в зависимости от длины забойки. Разработана методика определения параметров пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на глубоких карьерах. Разработана поглотительная смесь, позволяющая интенсифицировать процесс осаждения пыли над местом взрыва и уменьшить загрязнение окружающей карьер территории, что благоприятно отражается на экологической обстановке в регионе производства горных работ. Разработан способ снижения пылегазовыделений при ведении взрывных работ на карьерах, позволяющий снизить концентрацию образовавшегося пылегазового облака.*

Область применения результатов. *Способ подавления пылегазовых выбросов был внедрен на карьере Мурунтау Навоийского горно-металлургического комбината. В результате интенсифицирован процесс осаждения пыли над местом взрыва, уменьшено загрязнение*

окружающей территории, снижена концентрация диоксида азота на 30,1 %, оксида углерода на 28,6 % и сернистого ангидрида на 20,5 %. Полученные результаты могут найти применение на карьерах, где дробление горных пород производится буровзрывным способом.

Ключевые слова: *карьер; буровзрывные работы; пылегазовое загрязнение атмосферы; скважинный заряд; забойка; способ снижения пылегазовыделений; образование ядовитых газов.*

Введение. Анализ исследований по влиянию забоек различных видов и их параметров на эффективность дробления горных пород взрывом показал, что забойка оказывает существенное влияние на эффективность и безопасность взрывных работ, уменьшает потери энергии в процессе детонации заряда, увеличивает длительность воздействия газов взрыва на стенки скважины, уменьшает силу ударной воздушной волны и обеспечивает более полное протекание реакции взрыва [1–5].

Проблемам разрушения массива горных пород взрывом, подавления пылегазовых выбросов при массовых взрывах на карьерах и управлению энергией взрыва посвящено большое количество исследований [1–13]. Изучен процесс формирования и распространения пылегазового облака и разработаны методы снижения уровня пылевого загрязнения. Главными недостатками разработанных способов является трудоемкость процесса, невозможность размещения водяных струй и завес, ограниченность их дальнобойности во взрывном блоке и внутри пылегазового облака, сложность регулирования соотношения гелеобразующих компонентов.

На глубоких карьерах Республики Узбекистан в большей мере применяются эмульсионные ВВ, которые, как и другие типы промышленных ВВ, оказывают негативное воздействие на окружающую среду и организм человека. Из-за того, что физико-механические свойства горных пород влияют на процесс образования ядовитых газов, единые нормы по данному показателю для различных эмульсионных ВВ отсутствуют. В связи с этим необходимо соблюдать условие, что эмульсионное ВВ при взрыве не должно выделять газов больше принятой нормы.

Исследование и математическое моделирование параметров забойки в скважинных зарядах взрывчатых веществ. В результате действия заряда ВВ в скважине забойка выводится из состояния покоя, двигается по скважине, и после ее вылета из скважины происходит истечение продуктов детонации.

Установлено, что при использовании сплошной забойки изменяется давление и после вылета она продолжает оказывать противодавление истекающим продуктам детонации. Если в забоечном пространстве используется сыпучий материал, забойка разлетается в разные стороны после вылета.

Рассмотрен процесс движения забойки по скважине с учетом законов сохранения энергии, количества движения и потери импульса на трение для сыпучей и поглощающей забоек [14].

Исследовано изменение давления продуктов детонации с учетом процессов движения по скважине забойки из песка и поглощающей смеси различной длины, в результате которого установлено, что при использовании забойки из поглощающей смеси давление продуктов детонации и время вылета выше по сравнению с забойкой из песка.

Время вывода забойки в скважине из неподвижного состояния, мс, определяется по формуле:

$$t_1 = \frac{\lambda_1 l_з \rho_з C_{пр}}{P}\left(1+\lambda_2\frac{\rho}{\rho_з}\right)\left(1+\lambda_3\frac{\rho_з C_{пр}^2}{C_ч}\right), \quad (1)$$

где λ_1, λ_2, λ_3 – коэффициенты, определяемые экспериментальным путем и являющиеся функцией параметров $d_з/l_з$; $d_з$ – диаметр забойки, м; $l_з$ – длина

забойки, м; $\rho_з$ – плотность забойки, кг/м^3; $C_{пр}$ – скорость продольных волн в забоечном материале, м/с; P – давление продуктов детонации, МПа; ρ – плотность продуктов детонации, кг/м^3; $C_ч$ – сцепление частиц забоечного материала, кг/см^2.

Время движения забойки из поглощающей смеси в скважинном заряде ВВ, мс, определяется по формуле:

$$t_2 = \sqrt{\frac{\nu l_з}{\eta P}} \ln\left|\frac{\eta\, z}{1-\eta l_з} + 1\right|, \tag{2}$$

где η – коэффициент вязкости; ν – плотность забоечного материала, кг/м^3; z – время движения забойки, м/с.

Время движения песчаной забойки в скважинном заряде ВВ, мс, определяется по формуле:

$$t_2 = \sqrt{\frac{\nu l_з}{k^* P}} \ln\left|\frac{k^* z}{1-k^* l_з} + 1\right|, \tag{3}$$

где k^* – коэффициент трения.

В результате математического моделирования параметров забойки при взрыве скважинных зарядов ВВ установлено изменение давления во взрывной полости в зависимости от времени и длины песчаной забойки при ее вылете из скважины, а также продолжительности процесса вылета забойки и истечения продуктов детонации при взрыве ЭВВ в зависимости от длины забойки.

Давление продуктов детонации в скважине, МПа, определяется по формулам:

$$P_с(t_1) = \frac{\lambda_1 l_з \rho_з C_{пр}}{t_1}\left(1+\lambda_2 \frac{\rho}{\rho_з}\right)\left(1+\lambda_3 \frac{\rho_з C_{пр}^2}{C_ч}\right), \tag{4}$$

при использовании забойки из поглощающей смеси:

$$P_с(t_2) = \nu l_з \left(\ln\left|\frac{\eta z}{1-\eta l_з}\right|\right)^2 \Big/ t_2, \tag{5}$$

при использовании песчаной забойки:

$$P_с(t_2) = \nu l_з \left(\ln\left|\frac{k^* z}{1-k^* l_з}\right|\right)^2 \Big/ t_2. \tag{6}$$

В табл. 1 приведено изменение времени движения забойки в скважине в зависимости от длины забойки, в табл. 2 – изменение давления продуктов детонации в скважине $P_с$ в зависимости от времени с учетом длины забойки.

В результате исследования зависимости времени спада давления в скважине от длины забойки в различных сечениях скважины и сопоставления ее с временем полного квазистатического нагружения горных пород определена эффективная длина забойки, величина которой составляет 4,3–5,0 м.

Исследование образования ядовитых газов, выделяемых при массовых взрывах эмульсионными взрывчатыми веществами и разработка методики получения поглотительного раствора, способного нейтрализовать ядовитые соединения после взрыва. Исследованиями [15, 16] установлено, что образование ядовитых газов при производстве массовых взрывов зависит от состава, кислородного баланса и физико-химических свойств ЭВВ. Повышение плотности ЭВВ вначале приводит к уменьшению количества ядовитых газов, затем, после достижения определенной плотности, дальнейшее ее увеличение приводит к росту количества выделяющихся ядовитых газов, так как увеличение плотности ЭВВ приводит к снижению полноты его детонации.

Таблица 1. Изменение времени движения забойки в скважине в зависимости от длины забойки
Table 1. Change in the time of stemming motion in the well depending on the stemming length

Время, мс	$l_з$ = 5 м, песчаная забойка	$l_з$ = 5 м, поглощающая забойка	$l_з$ = 6 м, поглощающая забойка	$l_з$ = 8 м, поглощающая забойка
t_1	21	20	24	32
t_2	2,5	1,82	1,78	1,68

Установлено, что состав продуктов взрыва и количество ядовитых газов зависят от физических свойств горных пород. С увеличением крепости горных пород выделение оксида углерода увеличивается, а оксидов азота уменьшается.

Исследовано максимальное энерговыделение для ЭВВ с нулевым или положительным кислородным балансом. При высоких начальных температуре и давлении в начальный момент взрыва возможна частичная диссоциация CO_2 и H_2O, а также образование эндотермических соединений NO и C_2N_2 и др.

Составлена реакция взрывчатого превращения для ЭВВ с отрицательным кислородным балансом, рассмотрен метод максимального газообразования по принципу Ле Шателье–Малляра и произведен расчет состава продуктов взрыва по принципам Ле Шателье–Малляра и Бринкли–Вильсона.

Установлено, что при одинаковых давлениях и температурах диссоциация CO_2 развита в большей степени, чем диссоциация H_2O, вследствие этого реакция образования H2O будет превалировать над реакцией образования CO_2.

Разработана методика и произведен расчет параметров пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на глубоких карьерах, в результате которого установлено, что при прохождении взрывных газов через поглощающую смесь в забоечной части скважины происходит конвективная теплоотдача от газа смеси и потеря доли парциального давления на стенки скважины в месте расположения смеси. За счет потери тепла пылегазовое облако теряет часть своей энергии, что ведет к снижению высоты его подъема и тем самым предотвращает вынос его за пределы карьерного пространства.

Установлено, что масса пыли, выделяемой из блока при взрыве одной скважины, зависит от плотности горных пород, объема взрываемого блока, коэффициента разрыхления горных пород, размеров пылинок и кусков горных пород во взрывном блоке.

Разработан и обоснован метод получения поглотительных смесей при проведении взрывных работ. В результате испытания различных типов органических и неорганических соединений подобраны три соединения – негашеная известь, бентонит и соапсток, обладающие высокой вяжущей и поглотительной способно-

стью. Данные соединения при смешивании с водой обладают способностью одновременно расширяться, имеют вяжущие и быстро твердеющие свойства, необходимые для пыле- и газоподавления.

Разработка и промышленное испытание способа снижения пылегазовыделений при ведении взрывных работ на глубоких карьерах. Разработан способ подавления пылегазовых выбросов при взрывных работах на карьерах с использованием в забоечном пространстве скважин густого наполнителя, позволяющего улучшить экологическую обстановку на взрываемом блоке и близлежащей территории [8–11]. На рис. 1 показана схема заряжания каждой скважины при реализации предлагаемого способа пылеподавления с формированием густого наполнителя в забоечном пространстве скважины в герметичной оболочке.

Таблица 2. Изменение давления продуктов детонации в скважине в зависимости от времени с учетом длины забойки
Table 2. Change in detonation products pressure in the well depending on time with the account of the stemming length

Давление, МПа	$l_з$ = 5 м, песчаная забойка	$l_з$ = 5 м, поглощающая забойка	$l_з$ = 6 м, поглощающая забойка	$l_з$ = 8 м, поглощающая забойка
$P_с$ (t_1)	12,5	11,27	11,27	11,27
$P_с$ (t_2)	4,3	3,5	3,7	6,8

Согласно данному способу на месте производства массового взрыва бурятся скважины и заполняются ВВ с установкой промежуточных детонаторов по паспорту ведения БВР для данного карьера. Забоечную часть каждой скважины заполняют густым наполнителем, состоящим из известкового молока (1 кг извести на 20 л воды), соапстока (отхода масложирового комбината) и глиноподобной или супесеподобной горной породы (бентонит, супесь и т. п.) в пропорции 5 : 1 : 1. Густой наполнитель подготавливается отдельно на месте производства БВР в герметичной емкости и помещается в забоечное пространство в полиэтиленовом рукаве. Диаметр полиэтиленового рукава равен диаметру скважины, а его высота соответствует высоте забоечного пространства.

Соапсток выделяется при рафинировании растительных масел. Содержание жиров и омыленных жирных кислот в соапстоках составляет 50–70 %. Эти кислоты являются слабыми собирателями, но значительно селективны и обладают хорошими пенообразующими свойствами.

Состав соапстока приведен далее:

Жирность (общий жир) ..... 40–61 %
В том числе нейтральный жир ..... 23–28 %
Нежировые вещества (госсипол) ..... 3–12,5 %
Неомыляемые вещества ..... 2–2,7 %
Фосфорсодержащие вещества ..... 0,8–1,0 %
Внешний вид и цвет ..... Коричневый мазеобразный
Кислотное число ..... 71–100 кг/КОН
Растворимость в ацетоне ..... 80 %

Горный массив разрушается продуктами детонации ВВ, и переизмельченная порода, находящаяся близко к заряду, выбрасывается газообразными продуктами детонации, образуя пылегазовое облако. При этом в скважине из-за мгновенного сжатия под давлением газообразных продуктов детонации повышается температура густого наполнителя. В свою очередь, густой наполнитель, передавая долю

парциального давления на стенки скважины, усиливает запирающий эффект продуктам детонации ВВ из скважины. Таким образом, происходит дополнительная полезная работа разрушения горного массива.

В результате слипания мелких частиц пыли в пылегазовом облаке происходит их выпадение и нейтрализация образуемых при взрыве ядовитых газов. При вступлении в химическую реакцию ядовитых газов с густым наполнителем образуется жидкая фаза кислоты, осаждаемая также на месте производства массового взрыва. Таким образом, в окружающую среду не попадают ядовитые газы и предотвращается появление кислотных дождей.

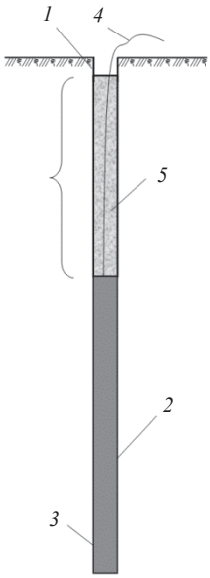


Рис. 1. Способ снижения пылегазовыделений при ведении взрывных работ на глубоких карьерах: *1* – скважина; *2* – взрывчатое вещество; *3* – промежуточный детонатор; *4* – средство инициирования; *5* – поглотительная смесь

Fig. 1. A method of reducing dust and gas emissions during blasting operations in open pits: *1* – well; *2* – explosive; *3* – booster; *4* – initiator; *5* – absorbing mixture

Разработанный способ подавления пылегазовых выбросов при взрывных работах на карьерах внедрен на карьере Мурунтау ГП «Навоийский горно-металлургический комбинат». В результате внедрения снижена концентрация диоксида азота на 30,1 %, оксида углерода на 28,6 % и сернистого ангидрида на 20,5 %.

Выводы и область применения результатов. Разработанная методика исследования параметров пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на глубоких карьерах позволяет определить давление газов взрыва в скважине, которое изменяется прямо пропорционально атмосферному давлению, объему газов ВВ, температуре взрыва и обратно пропорционально объему скважины. Разработан и обоснован метод получения поглотительных смесей при проведении взрывных работ. В результате испытания различных типов органических и неорганических соединений подобраны три соединения – негашеная известь, бентонит и соапсток, обладающие высокой вяжущей и поглотительной способностью. Данные соединения при смешивании с водой обладают способностью одновременно расширяться, имеют вяжущие и быстро твердеющие свойства, необходимые для пыле- и газоподавления. Разработан способ снижения пылегазовыделений при ведении взрывных работ на карьерах, отличающийся тем, что в забоечном пространстве скважин формируется густой наполнитель в герметичной оболочке, состоящей из известкового молока, соапстока и бентонита в соотношении 5 : 1 : 1. Данный способ позволяет интенсифицировать процесс осаждения пыли над местом взрыва и уменьшить загрязнение окружающей территории, что благоприятно отражается на экологической обстановке в регионе производства горных работ. Результаты опытно-промышленных испытаний разработанного способа снижения пылегазовыделений показали снижение концентрации образовавшегося пылегазового облака (диоксида азота на 30,1 %, оксида углерода на 28,6 % и сернистого ангидрида на 20,5 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сытенков В. Н. Управление пылегазовым режимом глубоких карьеров. М.: Геоинформцентр, 2003. 288 с.

2. Ahmed R. Comportement et fragmentation dynamique des matèrieaux quasi fragiles. Application à la Fragmentation des Roches par Explosifs; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supèrieure des Mines de Paris; 2004. 210 p.

3. Bernard T. maitrise de l'energie explosive: Action de l'explosif sur le milieu environnant; thèse de l'Institut de Geodynamique URA-CNRS; 1995. 187 p.

4. Donzè F. V., Bouchez J., Magnier S. A. Modeling fractures in rock blasting. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 1997. No. 34(8). P. 1153–1163.
5. Maerz N. H. Reconstructing 3D block size distributions from 2d measurements on sections. Proc. ISRM // Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, Publi A. A. Balkema, 1996. P. 39–43.
6. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. Wip Frag image based granulometry system // Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation. Montreal, Quebec, Canada, 1996. P. 91–99.
7. Munjiza A., Owen R. J., Bianic N. A. Combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids. Eng. Computations. 1995. No. 12. P. 145–174.
8. Peter B. Optimisation of fragmentation and comminution at boliden mineral. Aitik Operation, 2005. 179 p.
9. Rolf S. Paine, D. K. Holmes, Harri E. Clark. Presplit blasting at the niagara power project // The Explosives Engineer. 2003. Vol. 39. No. 3. P. 72–92.
10. Rossmanith H. P. The mechanics and physics of advanced blasting-waves. Shocks, Fracture, Damage, Impact and Profit, Short Course Frag Blast 8, 2006. 214 p.
11. Махмудов Д. Р., Петросов Ю. Э. Технология производства буровзрывных работ на глубоких карьерах Узбекистана // ГИАБ. 2017. № 5. С. 331–337.
12. Умаров Ф. Я., Махмудов Д. Р., Петросов Ю. Э. Исследование снижения прочностных и деформационных свойст различных горных пород при многократных взрывных нагрузках // Горный вестник Узбекистана. 2017. № 4. С. 14–18.
13. Умаров Ф. Я., Махмудов Д. Р., Петросов Ю. Э., Мардонов И. Н. Районирование карьерного поля Кальмакыр по буримости и взрываемости // Вестник ТГТУ. 2017. № 1. С. 229–235.
14. Заиров Ш. Ш., Тухташев А. Б., Норматова М. Ж., Рустамов О. И. Исследование влияния забойки скважинного заряда на эффективность разрушения и пылеподавления // Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития: матер. Республ. науч.-техн. конф. Навои, 15–16 ноября 2016. С. 41–42.
15. Мислибаев И. Т., Заиров Ш. Ш., Тухташев А. Б., Норматова М. Ж. Уменьшение пылегазового загрязнения атмосферы при производстве массовых взрывов на карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 2. С. 39–43.
16. Заиров Ш. Ш., Норматова М. Ж. Разработка способа снижения пылегазовыделений при ведении взрывных работ на карьерах // Горный вестник Узбекистана. 2016. № 4. С. 33–34.

Поступила в редакцию 19 декабря 2019 года

Сведения об авторах:

Заиров Шерзод Шарипович – доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Навоийского государственного горного института. E-mail: sher-z@mail.ru
Худайбердиев Ойбек Жумаевич – старший преподаватель кафедры высшей математики и информационных технологий Навоийского государственного горного института. E-mail: o.khudayberdiev@inbox.uz
Норматова Муборак Жабборовна – заместитель декана горного факультета Навоийского государственного горного института. E-mail: m.normatova@inbox.uz
Номдоров Рустам Уралович – ассистент кафедры горного дела и геодезии Каршинского инженерно-экономического института. E-mail: r.nomdorov@inbox.uz

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-113-121

Developing the methods of controlling dust and gas conditions when blasting high benches in deep pits

Sherzod Sh. Zairov[1], Oibek Zh. Khudaiberdiev[1], Muborak Zh. Normatova[1], Rustam U. Nomdorov[2]
[1] Navoi State Mining Institute, Navoi, Uzbekistan.
[2] Karshi Engineering and Economic Institute, Karshi, Uzbekistan.

Abstract
Research aim *is to develop a method of reducing dust and gas emissions concentration at bulk explosions in open pits.*
Research relevance. *When drilling and blasting in open pits, a huge amount of dust and toxic gaseous products is released, and the rate of their formation is affected by the blasting method, the range of explosives used, the method of drilling blast holes, type and sort of stemming, massif water content, rock properties, meteorological conditions, etc. It has been established that in an explosion of 1 kg of explosives, 15% from an average of 900 liters of various gases and gaseous products formed are toxic and dangerous to humans and the environment. To prevent dust and gas emissions, various types of tamping are currently used, which affect not only emissions reduction, but also the efficiency and safety of blasting contributing to the fullest use of explosion energy and increasing the exposure time of the products of explosive*

transformation. Despite the significant amount of research and successes achieved in this direction, for deep pits it is necessary to determine the rational parameters of stemming in borehole explosive charges, reduce the formation of toxic gases released in bulk explosions, develop a method of producing an absorption solution capable of neutralizing toxic compounds after an explosion, and develop an effective way to reduce dust and gas emissions in bulk explosions.

***Research methodology**. To solve this problem, integrated research methods were used, including theoretical generalizations and experimental studies in laboratory, testing ground and industrial conditions, methods of mathematical modeling of stemming parameters in borehole explosive charges, methods of mathematical programming using modern computer equipment, as well as methods of mathematical statistics and correlation analysis of research results.*

***Results.** Detonation products pressure change in the well has been determined taking into account motion processes of sand and absorbing mixture stemming of various lengths. It has been established that when using stemming made of absorbing mixture, detonation products pressure and escape time are higher compared to sand stemming. The effective stemming length in borehole explosive charges has been established depending on well pressure fall time and stemming length in different sections of the well. Mathematical modeling of stemming parameters in the explosion of borehole explosive charges established the change in pressure in the blast chamber as a function of stemming time and length during its escape from the well, as well as the of stemming escape duration and expiration of detonation products during emulsion explosive blast depending on stemming length. A method has been developed of dust and gas atmospheric pollution parameters determination during the production of bulk explosions in deep pits, An absorption mixture has been developed, which makes it possible to intensify the process of dust deposition above the explosion site and reduce pollution of the surrounding quarry, which favorably affects the environmental situation in the mining region. A method has been developed to reduce dust and gas emissions during blasting operations in open pits, which allows to reduce the concentration of dust and gas clouds formed.*

***Scope of the results.** A method of suppressing dust and gas emissions has been introduced at the Muruntau open pit of the Navoi Mining and Metallurgical Combinat. As a result, the process of dust deposition above the explosion site has been intensified, pollution of the surrounding open pit area has been reduced, the concentration of nitrogen dioxide has been reduced by 30.1%, carbon monoxide by 28.6% and sulfur dioxide by 20.5%. The results can be used in quarries where rock crushing is carried out using a blasting method.*

***Key words:** open pit; drilling and blasting operations; dust and gas atmospheric pollution; borehole charge; stemming; dust and gas emissions reduction method; toxic gases formation.*

REFERENCES

1. Sytenkov V. N. *Management of dust and gas regime of deep pits*. Moscow: Geoinformtsentr Publishing; 2003. (In Russ.)

2. Ahmed R. *Comportement et Fragmentation Dynamique des Matérieaux QuasiFragiles. Application à la Fragmentation des Roches par Explosifs; Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*; 2004. 210 p.

3. Bernard T. *Maitrise de l'Energie Explosive: Action de l'explosif sur le milieu environnant; thèse de l'Institut de Geodynamique URA-CNRS*; 1995. 187 p.

4. Donzé F. V., Bouchez J., Magnier S. A. Modeling Fractures in Rock Blasting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*. 34(8); 1153–1163; 1997.

5. Maerz N. H. Reconstructing 3D Block Size Distributions from 2D Measurements on Sections. Proc. ISRM. *Fragblast 5 Workshop and Short Course on Fragmentation Measurement, Montreal, Publi A. A. Balkema*; 1996. p. 39–43.

6. Maerz N. H. Wip Frag image based granulometry system. *Proceedings of the FRAGBLAST5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, Montreal. Quebec*. Canada; 1996. p. 91–99.

7. Munjiza A., Owen R. J., Bianic N. A. Combined finite-discrete element method in transient dynamics of fracturing solids. *Eng. Computations*. 1995; 12: 145–174.

8. Peter B. Optimisation of fragmentation and comminution at boliden mineral. *Aitik Operation*; 2005. 179 p.

9. Rolf S. Paine, D. K. Holmes, Harri E. Clark. Presplit blasting at the niagara power project. *The Explosives Engineer*. 2003; 39 (3): 72–92.

10. Rossmanith H. P. The mechanics and physics of advanced blasting-waves. *Shocks, Fracture, Damage, Impact and Profit, Short Course Frag Blast 8, 2006*. 214 p.

11. Makhmudov D. R., Petrosov Iu. E. Drilling and blasting technology in the deep quarries of Uzbekistan. Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining Journal of Uzbekistan. 2017; 5: 331–337. (In Russ.)

12. Umarov F. Ia., Makhmudov D. R., Petrosov Iu. E., Mardonov I. N. The study of reducing the strength and deformation properties of various rocks with multiple explosive loads. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining Journal of Uzbekistan*. 2017; 4: 14–18. (In Russ.)

13. Umarov F. Ia., Makhmudov D. R., Petrosov Iu. E. Zoning of the Kalmykir quarry field by drillability and explosiveness. *Vestnik TGTU = Transaction of the TSTU*. 2017; 1: 229–235. (In Russ.)

14. Zairov Sh. Sh., Tukhtashev A. B., Normatova M. Zh., Rustamov O. I. Investigation of the effect of stemming a borehole charge on the efficiency of destruction and dust suppression. In: *Mining and metallurgical complex: achievements, problems and prospects of innovative development: proc. of republican scientific and technical conference*. Navoi, 15–16 November, 2016. p. 41–42. (In Russ.)

15. Mislibaev I. T., Zairov Sh. Sh., Tukhtashev A. B., Normatova M. Zh. Reduction of dust and gas pollution of the atmosphere under the production of bulk explosions at open pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 2: 39–43. (In Russ.)

16. Zairov Sh. Sh., Normatova M. Zh. Development of a method for reducing dust and gas emissions during blasting operations in open pits. *Gornyi vestnik Uzbekistana = Mining Journal of Uzbekistan*. 2016; 4: 33–34. (In Russ.)

Received 19 December 2019

Information about authors:

Sherzod Sh. Zairov – DSc (Engineering), professor of Mining Department, Navoi State Mining Institute. E-mail: sher-z@mail.ru
Oibek Zh. Khudaiberdiev – senior lecturer, Department of Higher Mathematics and Information Technologies, Navoi State Mining Institute. E-mail: o.khudayberdiev@inbox.uz
Muborak Zh. Normatova – Dean Deputy, Mining Faculty, Navoi State Mining Institute. E-mail: m.normatova@inbox.uz
Rustam U. Nomdorov – assistant lecturer, Department of Mining and Geodesy, Karshi Engineering and Economic Institute. E-mail: r.nomdorov@inbox.uz

Для цитирования: Заиров Ш. Ш., Худайбердиев О. Ж., Норматова М. Ж., Номдоров Р. У. Разработка способов управления пылегазовым режимом при взрывании высоких уступов в глубоких карьерах // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 113–121. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-113-121
For citation: Zairov Sh. Sh., Khudaiberdiev O. Zh., Normatova M. Zh., Nomdorov R. U. Developing the methods of controlling dust and gas conditions when blasting high benches in deep pits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 113–121 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-113-121

УДК 37.03:82+378.662 DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-122-133

Гуманитарная составляющая в техническом вузе (на примере современной художественной литературы)

Кардапольцева В. Н.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: kardapol@mail.ru

Реферат

Введение. *Современное стремительно развивающееся общество требует от специалистов-инженеров инициативности, творческого подхода к решению технических задач, умения преодолевать стереотипы, руководствуясь потребностями растущей и меняющейся экономической реальности, что обусловлено требованием времени и необходимым условием формирования инженера XXI века. Образовательный процесс в условиях современности должен быть не только существенно обновлен арсеналом средств компьютерных технологий, но и опираться на идею синтеза естественнонаучных знаний и элементов гуманитарных наук, где художественная литература играет немаловажную роль.*

Цель работы. *Посредством художественной литературы интегрировать обучение и воспитание, формировать мировоззрение, потребности в становлении духовно богатой, социально мобильной, с чувством собственного достоинства личности, способной реализоваться как в области технического, так и гуманитарного направления.*

Методология. *Герменевтический метод применялся для анализа художественных произведений разных авторов и трактовок таких понятий, как сюжет, идея, проблематика, образная система. Материалом эмпирического метода стали художественные тексты разных стран, значимые с точки зрения целевой установки исследования, выявления и осмысления специфических особенностей. Контекстный метод позволил углубиться в содержание анализируемых произведений.*

Результаты. *Доказано, что мир художественной литературы формирует гражданина, человека высокой культуры, способствует развитию эвристического мышления, эстетического вкуса и идеалов, расширяет грани инженерного творчества и обеспечивает оптимальную адаптацию выпускника вуза в условиях экономики и рыночных отношений, а также способствует формированию у студенческой молодежи потребности в саморазвитии и самоутверждении в качестве самостоятельного творческого субъекта культуры, определенного типа личности.*

Ключевые слова: *современная молодежь; художественные тексты; мировоззрение; зарубежная литература; интегрирующая функция; проблематика.*

Подготовка специалистов в техническом вузе имеет тенденцию к интеграции инженерных и гуманитарно-художественных знаний. Современное стремительно развивающееся общество требует от специалистов-инженеров инициативности, творческого подхода к решению технических задач, умения преодолевать стереотипы, руководствуясь потребностями растущей и меняющейся экономической реальности, что обусловлено требованием времени и необходимым условием формирования инженера XXI века. Образовательный процесс на современном этапе должен быть не только существенно обновлен арсеналом средств компьютерных технологий, но и опираться на идею синтеза естественнонаучных знаний и элементов гуманитарных наук, где художественная литература играет немаловажную роль. Студент должен иметь широкий общекультурный диапазон, быть

способным отличать подлинную культуру от ее суррогатов, сохранять, распространять, приумножать культурное богатство, пополняя его материальными и духовными ценностями. Именно через художественное творчество, литературу в частности, во многом осуществляется гармоничный синтез техники и искусства. Художественная литература позволяет органично интегрировать обучение и воспитание, формировать мировоззрение, потребности в становлении духовно богатой, социально мобильной, с чувством собственного достоинства личности, способной реализоваться как в области технического, так и гуманитарного направления. При включении литературных текстов в контекст негуманитарных дисциплин происходит более глубокое осмысление динамических социокультурных процессов как прошлого, так и настоящего, появляется возможность заглянуть в будущее. Именно литература, являясь средством всеобщей связи между людьми, в силу своей «провидческой» способности предугадывает «заранее приближающееся будущее», сосредотачивает свое внимание на актуальных явлениях, еще ждущих своего научного исследования.

В наш техногенный век всеобщей компьютеризации и цифровизации интерес к бумажному книжному источнику знания (как в целом и к небумажному), к сожалению, угасает. Современная культура богата множеством разнообразных средств получения информации помимо книжного варианта, поэтому чтение в качестве источника знаний и культурной коммуникации давно не относится к предметам первой необходимости в арсенале современной молодежи, хотя долгое время Россия считалась самой читающей страной в мире. Художественная литература, к сожалению, лишь для немногих остается интеллектуально-эмоциональной и *образовательно-воспитательной* составляющей в сложном и многовекторном техногенном мире. Грибоедовско-фамусовское изречение «забрать все книги бы да сжечь» и горьковское «любите книгу – источник знаний» – это не только печальная антитеза современного социокультурного пространства, но и емкая метафора времени. Однако «чувства добрые» художественная литература предназначена пробуждать не только в рамках гуманитарного направления, она не менее важна в контексте технической специализации, поскольку главной функцией художественной литературы можно назвать *человекотворческую.* В современной обстановке радикальных противоречий между условиями, создающими возможности для культурного, интеллектуального, коммуникативного, физического развития личности, и условиями, ведущими к формированию «одномерного существа» (потребителя, геймера, одностороннего специалиста, вплоть до усредненной посредственности), литература способствует становлению целостной личности. Благодаря широкому охвату тем и проблем художественные тексты дают возможность наметить путь сохранения и преобразования окружающего мира и самого себя, активизируя творческую сущность личности. На *макроуровне* – в процессе становления гражданского общества, регулирования межнациональных отношений на основе принципа равенства и толерантности. На *микроуровне* – в семье, в поступке, определенном уровне развития нравственной культуры, закрепляя непреходящие вечные ценности.

Большинство текстов художественной литературы помимо эмоционально-образной составляющей отличаются подчеркнутой социализацией в аспекте экономических, социальных, повседневных связей, благодаря чему персонаж приобретает четкие социально-психологические очертания. Однако исключительно социальными параметрами ценность художественной литературы не ограничивается. Вдумчивое и глубокое погружение в повествование расширяет интеллектуальный, научно-теоретический, исторический, региональный, политический багаж, а также способствует антропологической эволюции.

Наполненный гаджетами социум, бюрократизированный до предела, не инициирует современную молодежь, студенчество в том числе, погружаться в мир книжной культуры, в литературные тексты, осознавать ее ключевые направления и художественно-стилистические особенности. Однако многолетний опыт работы со студентами свидетельствует о том, что большинство из них интересуется особенностями молодежной культуры не только своей страны, но и других государств, миром повседневности разных культурных регионов. Перед молодым человеком, вступающим в жизнь, нередко стоят проблемы, связанные с поиском смысла жизни, места в ее быстротекущих потоках, опоры, выбора пути, преодоления многочисленных житейских и социальных препятствий. В художественных текстах как отечественных, так и зарубежных авторов можно найти ответы на многие вопросы, будоражащие душу и сердце. Современная художественная литература в лучших ее образцах помогает ответить на многие волнующие молодежь вопросы. В значительной степени она обращена к миру повседневности, нежели к социально-политическим аспектам, поскольку именно повседневность, больше чем какая бы то ни было сфера, аккумулирует творческий потенциал личности, ее становление и самоопределение.

Материалом рассмотрения данной статьи является *современная зарубежная литература*, имеющаяся в арсенале библиотечных фондов Уральского государственного горного университета, но, к сожалению, недостаточно востребованная студенческой аудиторией, хотя многие приведенные в статье авторы удостоены высших наград в области литературы. Подобная отстраненность от бумажных источников информации объясняется, как уже отмечено, всеобщим погружением в мир современных гаджетов, почти полностью заменивших книгу. Предпочтение *зарубежной* литературы мотивировано возможностью выхода за границы отечественного культурного пространства, за пределы привычного. Знакомство с текстами зарубежных авторов (как европейских, так и восточных регионов) позволит студенту не только расширить знания о мире, но и осознать многовекторность и общность пульсирующих проблем, существующих вне зависимости от региона и национальности. Кроме того, многообразие социокультурных пространств в художественных текстах авторов разных стран поможет представить национальные особенности, традиции, своеобразие культурных доминант, способы освоения и передачи культурного опыта в разных сферах жизнедеятельности.

В последние годы российские читатели благодаря переводам на русский язык имеют возможность познакомиться с яркими именами зарубежных авторов, актуализирующих общие для многих стран проблемные векторы.

К. Гир, Н. Барро (Германия); Ф. Бегдеберг, А. Говальда, В. Собат, К. Панколь, К. Аткинсон, Б. Мюриель (Франция); М. Бинчи (Ирландия); Х. Вассму (Норвегия); К. Ингемарсон, Л. Олссон, М. Фредрикссон (Швеция); Д. Фаулз, С. Фолкс, М. Этвуд (Канада); П. Джордано, Э. Ферранте (Италия); Д. Роулинг (Англия); Д. Тартт, У. Швальбе, Д. Киз (Америка); К. Исигуро (Япония), Х. Хосейни (Америка, Афганистан); Дэ Сижи (Китай), Л. Си (Корея); О. Памук (Турция) – произведения этих авторов отличаются своеобразием художественного почерка, собственной стилистикой, разнообразием сюжетной линии. Все они с убедительной достоверностью повествуют о пульсирующих проблемах времени: *путях самоопределения и самореализации современной молодежи, поисках смысла жизни, своего места в сложном и меняющемся мире; идентификации другого/иного в мире социума; национальной, этнической, религиозной, гендерной идентичности; толерантности/интолерантности; семейных отношениях (проблемы воспитания, отчужденности, насилия в семье); формировании, становлении/разрушении личности и пр.*

Методически грамотно и продуманно выстроенная работа преподавателя позволит интегрировать художественные произведения в контекст занятий по профессиональной подготовке, приобщить студентов к богатому опыту словесного творчества, актуализировать волнующие всех проблемы через призму читаемой дисциплины, расширив тем самым границы знаний и по своей специальности, и культурные в целом. Настоящая статья не предполагает решения методических приемов проведения занятий, не даются рекомендации. Задача – познакомить с современными зарубежными авторами, которые, на взгляд автора статьи, интересны и полезны как студентам, так и преподавателям широтой и актуальностью затронутых аспектов, волнующих во все времена молодежь (все упоминаемые произведения имеются в библиотечных фондах УГГУ).

Проблема самореализации, саморазвития, самопознания личности – одна из доминирующих во множестве произведений. Многие зарубежные авторы с разной степенью достоверности воспроизводят жизнь современной молодежи. На страницах книг представлено новое поколение молодежи, бескомпромиссное, дерзкое, целеустремленное, которое, несмотря ни на какие житейские бури, становится сильным, самодостаточным, надеющимся только на себя.

Достаточно убедительным свидетельством тому можно считать недавно экранизированный роман *Донны Тартт «Щегол»* [1], рассказывающий о жизни современной американской молодежи. Сюжет строится вокруг жизненных перипетий Тео Деккера, подростка, у которого все, казалось бы, складывалось отлично: благополучная семья, любимая мать, с которой полное взаимопонимание. Однако вся его жизнь изменилась за считанные минуты во время посещения вместе с матерью музея, где произошел взрыв. Он чудом остался жив, но его мать погибла. Оставшись без единой родной души, Тео скитается по разным *американским* штатам, чужим домам и семьям, вплоть до *амстердамских* гостиничных номеров, знакомится с разными людьми. На его долю выпало много полных драматизма историй и предательств, но благодаря предприимчивости и аналитическому уму герой выходит из самых непредсказуемых и немыслимых ситуаций. Эпическое полотно Донны Тартт с глубочайшей откровенностью представляет картину современного общества, где бок о бок сосуществуют как фешенебельные дома, так и наркоманские притоны, рисует мир, где царит равнодушие к чужим бедам, бедам ребенка в том числе. Воспроизведены особенности жизни американской молодежи, их увлечения, заблуждения, измены, вражда, дружба, готовность прийти на помощь. Дана галерея образов, человеческих типов: от нью-йоркского богатого мецената и талантливого краснодеревщика до опасного криминального элемента, не считающегося ни с какими нормами и запретами. Автор несет мысль о неисчерпаемых человеческих возможностях, а также о силе искусства, что способно перевернуть целую жизнь, раскрыть как самые возвышенные, так и самые низменные инстинкты. Перед читателем открывается целая гамма чувств и переживаний молодого человека, решаются важнейшие для каждого вступающего в жизнь проблемы и раскрываются понятия преданности, любви, веры, безверия.

Иная по тональности, переплетению судеб, сюжетных линий, трилогия французской писательницы и журналистки *Катрин Панколь* [2] *«Желтоглазые крокодилы»*, *«Черепаший вальс», «Белки в центральном парке по понедельникам грустят»* объединена героями и сюжетом, в котором прослеживается динамика взросления и личностного становления разных героинь. На примере одной из них, капризной и требовательной Гортензии, девушки прагматичной, жесткой, уверенной и циничной в глазах других, показан непростой путь в профессию дизайнера. С каким достоинством и высокомерием она несет себя в мире повседневности! С какой целеустремленностью и самоотдачей добивается высот на

пути к самоутверждению в избранной ею дизайнерской деятельности! Автор с удивительным искусством и многогранностью рисует образ современной деловой женщины, способной добиться своей цели благодаря неустанной и терпеливой работе над повышением своего профессионального уровня. В образе этой, казалось бы, неуправляемой капризницы, воспроизведен тип современной максималистки [3], внешне лишенной всякой сентиментальности, добивающейся конкретной цели, не отвлекаясь ни на какие соблазны, умеющей не только отстаивать свои интересы, но и способной подать руку помощи тому, кто в ней нуждается.

Многие представители современной молодежи, стоящие на перепутье дорог, не хотят быть такими, как все, стремятся иметь собственное лицо, подчеркнутую индивидуальность, ищут свои пути самоутверждения.

Презентация *другого*, *иного* в контексте современной культуры, вобравшей в себя все сложности и противоречия – одна из сквозных тем художественной литературы последних лет. Категория «*другости*» не раз поднималась в современном науковедении. Исчерпывающий экскурс в проблему *другого*, об отношении к нему в обществе и отражении в художественной культуре осуществляет известный культуролог Е. Н. Шапинская [4]. Обобщая исследования прошлого и настоящего, опираясь на тексты литературы, музыкальных произведений, кинематографа, ученый делает вывод, что тип *другого* не зависит ни от времени, ни от пространства и встречается в культурных текстах всех времен и народов и не обусловлен историко-культурным контекстом.

В художественных текстах последних лет *другой* позиционируется по *национальному*, *гендерному*, *субкультурному* признаку, *по отношению к другому* субъекту (коллективу), *по собственному выбору*, как утверждение своего субъектного статуса.

Роман английского писателя *Джона Фаулза «Коллекционер»* [5] поражает цинизмом и жестокостью главного героя, являющегося другим *по собственному выбору*, человеком, желающим утвердить свой среднестатистический статус. В центре романа – самодовольная, закомплексованная посредственность, возомнившая себя хозяином чужих судеб. Даже именем не наделен этот антигерой. Внешняя чистота (накрахмаленные белоснежные рубашки, воротнички, чистейшие ботинки, ни пылинки в доме) оттеняют внутреннюю звериную сущность. Другость главного героя романа – скрытое от всех желание выделиться из толпы, возвыситься над ней, осознать себя властелином. Он прячет молодую красивую девушку, готовящуюся стать дизайнером, отмеченную наградой за творческие успехи, у себя в подвале. Автор с технологической точностью описывает, как этот монстр тщательно продумывает все инженерные составляющие, связанные с коммуникационными и прочими «удобствами» для будущей узницы. *Другость* личности, моделируемая у него изнутри, – основной принцип построения жизненного мира этого антигероя. Безнравственный, невежественный, без имени, он упивается своим мелочным, эгоистичным состоянием быть властелином чьей-то жизни и судьбы. Никакие усилия высокообразованной и интеллектуальной узницы Миранды не могли продвинуть даже на шаг эту закостенелую в своем невежестве и примитивизме натуру монстра. Случайно попавшие в его руки большие деньги (выиграл на скачках), с которыми он в силу своей убогости не знает, как обращаться, вскрыли самые темные подвалы его души, всю никчемность его внутренней сути, лишенной живой человеческой мысли. Интерес представляют проникновенные дневники пленницы, которые она прятала от истязателя. В них размышления об искусстве, литературе, философии, морали, свидетельствующие о глубине и зрелости ума этой двадцатилетней девушки. Книга с жестокой откровенностью вскрывает психологию никчемной человеческой души, способной на

самые немыслимые с позиции этики и морали поступки. Коллекционирование экзотических бабочек и незаурядных девушек – на одном уровне для этого примитивного и амбициозного субъекта, растаптывающего и уничтожающего красоту, интеллект, добрые побуждения.

Другими по отношению к окружающим в силу разных обстоятельств оказываются Аличе и Маттиа – герои роман итальянского писателя, физика-теоретика *Паоло Джордано «Одиночество простых чисел»* [6]. Представлена грустная история двух «изгоев», которые чужаки в мире социума. Издевательства одноклассников, насмешки, «подставы» – все пришлось испытать Аличе и Маттиа, вынужденных отгородиться от окружающих. Будучи незаурядным, перспективным, гениальным математиком, большим ученым, Матиа так и не сумел преодолеть все комплексы и унижения, перенесенные им в детстве, даже не нашел сил состояться в любви. Это драма о сломанных судьбах, о тех, кому не удалось вписаться в «серийный» поток *подавляющего* большинства, захватывающая и проникновенная книга об одиночестве и любви.

Близко по тематике роману П. Джордано и произведение *Дж. К. Роулинг «Случайная вакансия»* [7], известной миру своими книгами о Гарри Поттере. Тема другого раскрыта Роулинг более основательно, откровенно, заостренно и представлена в разных аспектах: социальном, этническом, семейном. Рассмотрена проблема вопиющего равнодушия в современном обществе, в том числе к подросткам, которыми никто не интересуется и не пытается понять, включая родителей. Они оказываются лишними в семье, школе, обществе и вынуждены жить в своем, изолированном от взрослых, мире. Представлено правдивое, отнюдь не оптимистическое повествование о жизни английской молодежи. На примере тихого провинциального городка, где бушуют страсти (непримиримая война богатых с бедными, подростков – с родителями, жен – с мужьями, учителей – с учениками), обозначены значимые проблемы социального расслоения современного общества, прослежен непрямой и «неправедный» путь к власти. Случайная вакансия высветила большие социальные и политические проблемы маленького уютного городка, который далек от идиллии, как кажется на первый взгляд.

Тема *другого* по *гендерному* признаку давно не нова как в жизни, так и в художественной литературе и актуализируется во многих произведениях отечественных и зарубежных авторов. Интересным в этом плане можно считать роман австралийского писателя, дважды лауреата Букеровской премии *Питера Кери «Вдали от дома»* [8]. Главная героиня Айрин Бобс, увлекающаяся быстрой ездой, принимает решение участвовать в жестокой автогонке через весь континент по опасным дорогам Австралии, по которым не каждый мужчина отваживается проехать. Ее целеустремленность, сила воли, предприимчивость, мастерство (самостоятельно устраняет многие технические неполадки), уверенность в достижении цели приводят к долгожданной победе. Однако при подведении итогов о заслугах этой хрупкой, но отважной женщины, рисковавшей своей жизнью ради детей, никто даже не вспоминает. Все «лавры» достаются мужчинам, в том числе мужу, автодилеру-неудачнику, который не только не способствовал победе, но из-за собственной беспомощности и неуверенности препятствовал достижению цели, а также организаторам, не оказавшим ни малейшей помощи. Роман – очередное напоминание об извечной несправедливости в оценке заслуг женщины по сравнению с мужчиной. Питер Кери кроме гендерной озвучивает еще одну пульсирующую с давних времен тему – *другость* по *национальному* признаку, в произведении показан неприкрытый расизм. Роман – это размышление о цене успеха, за которым нередко лишь пустота, фикция, фальшь; о подлинном и ложном в современном мире бессмысленных и неоправданных скоростей. Всем ходом

повествования австралийский писатель напоминает, что, даже когда мы находимся *вдали от дома*, это может являться лишь иллюзией. История каждой страны хранит свои секреты и глубинные взаимосвязи.

Особый тип *другости* представлен американским писателем в романе *«Цветы для Элджернона»* [9], автор которого *Даниел Киз*, имеющий степень бакалавра по психологии, удостоенный звания почетного профессора университета Мичигана. В центре повествования Чарли Гордон, отстающий в своем умственном развитии, вследствие чего является предметом постоянных насмешек окружающих. Известные ученые после успешной операции над мышью по кличке Элджернон решились на рискованный эксперимент перенесения этой сложнейшей операции на человека. Повествование ведется от лица главного героя и представляет собой *отчеты* Чарли, фиксирующие динамику поведения и его отношения к миру. Если в начале отчетов изложение пестрит многочисленными орфографическими и синтаксическими ошибками, свидетельствуя об отклонении Чарли в умственном развитии, то в результате операции меняется и усложняется не только стилистика отчетов, но и мировоззрение героя, его личная жизнь. Операция по улучшению хирургическим путем интеллекта умственно отсталого человека, казалось бы, завершилась успешно. В результате стремительного роста IQ происходят сложные процессы осознания себя как полноценной личности, Чарли даже добивается высот в науке. Однако со временем интеллект начинает снижаться так же быстро, как и повышался, вернувшись в первоначальное состояние. Желание героя стать таким, как все, не увенчалось успехом. Роман Д. Кизи – некая реминисценция произведения Б. Шоу «Пигмалион» и булгаковского «Собачьего сердца». Весь ход повествования ставит перед читателем ряд вопросов. *Другой* – кто он? Каково его место в социуме? Имеет ли ученый право ставить эксперименты над живыми людьми, пусть не похожими на большинство? Задача читателя – найти ответы на эти и другие не менее важные вопросы, заданные американским писателем.

Достаточно актуальны для современного молодого читателя, находящегося на перепутье политических, религиозных, этнических векторов, произведения писателей Востока: К. Исигуро, Хосейни, Памука, Мин Чжин Ли, Де Сижи и др. Литература Востока – это в определенной степени открытие для российского читателя.

Антитезы человек – семья, человек – общество, человек – человек, человек – машина находятся в центре внимания авторов произведений разных стран, далеких по политическому строю, религиозным предпочтениям, национально-этническим доминантам. Эти проблемы сближают писателей Японии, Афганистана, Китая, Кореи, Турции. Погрузиться в иной, незнакомый мир Востока, почти неведомый широкому кругу читателей, позволяют вышедшие в последние годы произведения К. Исигуро, Х. Хосейни, Дэ Сижи, Мин Джин Ли, Лизы Си, Охара Памука и др. Авторы с удивительной глубиной и проникновенностью воссоздают страницы истории и культуры Востока.

«Снежный цветок и заветный веер» Лизы Си [10] – историка, журналиста, писателя с китайскими корнями – очень изящное и тонкое произведение. Представлен причудливый и колоритный мир культуры Китая XIX века на примере судеб двух подруг-китаянок разных социальных слоев. От лица главной героини Лилии дано скрупулезное, исторически достоверное художественное повествование о культуре Востока. Через призму ее восприятия приоткрывается завеса тайны особого, изолированного мира китайской женщины. Описаны жесткие и мучительные ритуальные церемонии каждого этапа становления и взросления девочки, девушки, женщины, порой шокирующие и пугающие своей суровостью и непреклонностью. Любовь к жизни, духовная и душевная сила помогают бес-

правной восточной женщине вынести физическую и моральную боль, связанную с унизительными традициями, преодолеть все препятствия и пройти путь от «никчемной девчонки» из бедной семьи до почтенной и влиятельной вдовы. Воспоминания Лилии воспроизводят повседневную жизнь простых китаянок, рассказывают о сладостном мире тишины женских комнат с зарешеченными окнами, о мучительных и неизбежных болях забинтованных ног, о печальных или счастливых песнях, тайной женской письменности и безграничной покорности. «Снежный цветок и заветный веер» – увлекательное, эмоциональное и в то же время пугающе реалистичное произведение Лизы Си, это песнь женской дружбе, грустной и трогательной, которая помогает преодолеть многие трудности, способствует самоутверждению и самореализации.

Более глубокая в содержательном отношении и острая по проблематике трилогия американского писателя афганского происхождения, медика по образованию *Халеда Хоссейни* [11] *«Бегущая за ветром»*, *«Тысяча сияющих солнц»*, *«Эхо летит за горами»*, раскрывающая важные политические и национальные проблемы, происходящие в Афганистане. Повествование потрясло читателей всего мира многоплановостью тем, острым драматизмом сюжета, откровенностью сцен, глубиной поставленных проблем. Перед читателем проникновенное произведение о войне, любви, вражде, жестокости, доброте, преданности, верности. Автор описывает моменты, свидетелями которых были его близкие, с удивительной глубиной и достоверностью переданы исторические и политические события в Афганистане 1970–2000 гг. Раскрыты страшные и трагические страницы жестокого режима талибов 70-х гг. XX века. Цветущий Кабул из развивающегося города превращен в развалины.

Кроме военных событий представлена широкая картина жизни на Ближнем Востоке, традиции и обычаи, изображен далекий и неведомый мир афганской женщины. С невероятным знанием женской души переданы боль, муки, страдания, мысли, истинная сила любви, самопожертвования ради близких.

Несмотря на то что автор давно живет за пределами Афганистана, основной тематикой творчества Халеда Хоссейни продолжает оставаться судьба Афганистана и его народа, его волнуют отношения Афганистана с остальным миром. В своих произведениях автор поднимает множество проблем: отцы и дети, трусость и малодушие, дети на войне, религия, жизнь в эмиграции. Хоссейни – истинный сын своего народа, живущий заботой о его благе и процветании. Его книга показывает «человеческое лицо афганского народа» [12, с. 55], «предназначена не для времяпрепровождения, а для жизни» [12, с. 153].

Размышляя о месте художественной литературы, способствующей интеграции гуманитарного образования в процессе профессиональной подготовки специалиста любого профиля, логично рассмотреть еще одно произведение, в котором аккумулируются жизненные ценности Восточной Азии, нравы, обычаи, повседневный быт. Масштабная семейная сага *«Дорога в тысячу ли»*, созданная американкой корейского происхождения *Мин Чжин Ли* [13], раскрывает многие страницы культуры Востока. Несмотря на полифонизм образов, связующей нитью повествования является жизнь и судьба кореянки Сонджи, которая сумела сохранить человеческое достоинство и силу духа, вопреки колоссальным потрясениям, выпавшим на ее долю. Действие разворачивается на фоне страшных событий Второй мировой войны. Представлена живая история нескольких поколений (более чем полувека), живущих на маленьком острове Иондзу, близ корейского портового города Пусана. Первая мировая, Вторая мировая, оккупация Кореи, гражданская война, разделение страны – вехи, нашедшие отражение в эпопее Мин Чжин Ли. Рассказано о давних и сложных отношениях японцев и

корейцев, о тех, кто родился и жил в Корее, о тех, кто родился и умер в Японии, о необходимости балансировать между двумя национальными культурами. События даны с разных точек зрения: сквозь призму нескольких поколений, через переплетение судеб простых людей, их мысли, чувства, переживания. Много внимания уделено отношениям в традиционной и современной корейских семьях, проблемам мужской чести и достоинства, женской верности и непомерной силе материнской любви. Толерантность и интолерантность по отношению к людям, нациям, народностям – одна из ведущих тем эпопеи, что сближает роман Мин Чжин Ли и творчество Хоссейни.

Идентичность по национальному признаку – также одна из ведущих тем этой семейной саги. Раскрыта тема «человека без Родины», «дзаиничи» (этнические корейцы в Японии), показано их место на оккупированной японцами территории. Корейцу, как человеку второго сорта, официально были закрыты социальные лифты, несмотря на то что он родился и прожил всю жизнь в Японии, говорит по-японски. Возможно ли, оторвавшись от семьи, имея хорошее американское образование, получить новую идентичность, или национальные и этнические корни все равно не позволят это сделать – об этом масштабная сага «Дорога в тысячу ли». Это роман о чести, национальном достоинстве, о том, чем человек готов пожертвовать ради семьи. На фоне истории одной семьи передана атмосфера меняющейся и развивающейся Азии.

Интегрирующей функции художественного текста в образовательном процессе может способствовать не только его целостное восприятие, но и подстрочные сноски, которые порой содержат не менее емкую и важную информацию, полезную для ума и сердца. Использование *детективного* жанра в образовательном процессе не является достаточно привычным и востребованным, однако это один из излюбленных жанров современного читателя разного пола и возраста. Погрузиться в мир запутанных ситуаций и неожиданных поворотов, отвлечься от привычных и обыденных реалий жизни студентам может быть не только интересно, но и полезно. Увлекательное занятие, связанное с распутыванием замысловатых перипетий героев, можно использовать в учебном процессе, предварив заданиями, направленными на более глубокое погружение в текст, что поможет расширить знания в освоении той или иной дисциплины. Любопытными в плане знакомства с зарубежной культурой могут явиться детективы *Алана Бредли*, современного канадского писателя, долгое время работавшего радио- и телеинженером. Его произведения вызвали огромный интерес у широкого круга отечественного читателя. На фоне захватывающих, увлекательных и интригующих сюжетов автор с удивительной полнотой и наглядностью дает не только пищу для логико-аналитических упражнений ума, но и благодаря подстрочным сноскам помогает расширить знания о различных сферах культурной жизни Англии.

В качестве примера рассмотрим произведение *Алана Бредли «Сладость на корочке пирога»* [14], первое его произведение о наблюдательной и сметливой героине Флавии де Люс, распутывающей самые замысловатые преступления. В многочисленных подстрочных сносках упоминаются имена знаменитых ученых, философов, политических деятелей, писателей, музыкантов, художников, названия произведений, театров, издаваемых журналов: *Марш* – английский химик, разработавший тест для определения наличия мышьяка; *Невилл Чемберлен* – представитель династии Чемберленов, из которых вышел ряд британских политиков, государственный деятель, лидер консервативной партии, премьер-министр в 1937–1940 гг. [14, с. 65]; «*Колодец и маятник*» – рассказ Эдгара Аллана По [14, с. 169]; *Джордж Бруммель* (1778–1840) – английский денди, законодатель мод, ввел в моду черный мужской костюм с галстуком, ставший деловой и офи-

циальной одеждой [14, с. 119]; *Доктор Харви Криппен* (1862–1910) – американский врач, ставший фигурантом в одном из самых громких криминалистических дел XX века, обвинен в убийстве жены [14, с. 104]; «*Панч*», «*Лилипут*» – еженедельные юмористические журналы, издававшиеся в Лондоне, где печатались анекдоты, рассказы, фотографии [14, с. 309].

Следуя заранее подготовленным заданиям преподавателя, студенты могут почерпнуть много нового и интересного, пополнив свою интеллектуальную базу в области науки, искусства, открывая новые имена, узнавая об их роли и месте в истории. В сносках нередко дается интерпретация множества терминов, понятий из разных областей знаний, географических обозначений, видов искусства, названий одежды, обуви и пр.: *уитабикс* – фирменное название пшеничных батончиков из спрессованных хлопьев, подаются в Англии к завтраку с молоком [14, с. 19]; *ивовый узор* – традиционный синий рисунок на белом фарфоре с изображением птиц, стилизованных фигур китайцев под ивами или на мосту, создан английским гончаром Томасом Тернером в 1780 г. [14, с. 36].; *голландская дверь* – дверь, разделенная на верхнюю и нижнюю половины, каждая из которых может открываться отдельно [14, с. 71]; *веллингтоны* – высокие сапоги по имени графа Веллингтона, который ввел эту модель в начале XIX века [14, с. 54]; *шеллак* – естественная смола, природный лак [14, с. 176]; *хлороз* – разновидность малокровия; *робер* – карточная игра [14, с. 81]; *Маттерхорн* – вершина в Швейцарии [14, с. 267]; *расселский плис* – ткань в рубчик с хлопковой основой и шерстяным наполнением [14, с. 264]; «*Споуд*» – марка английского фарфора, по имени основателя фирмы Дж. Споуда [14, с. 7]; «*Хиллман*» – марка английских автомобилей, существовавших до 1976 года [14, с. 29].

В ткань художественного текста Алана Бредли органично вплетены сведения о науке, образовании, искусстве, своеобразии повседневной жизни, убранстве чопорного англичанина, его манерах, привычках, круге чтения и прочих сторонах культуры, что не нарушает основной линии захватывающего детективного сюжета. Так, например, описывая процесс поисков юной Флавией улик преступления, автор достаточно скрупулезно в материалах еженедельных газетных хроник отражает пульс повседневной жизни Англии 20-х годов XX века: «*Станица за страницей праздничные новости – рождественские гости с континента, отложенное собрание дамского общества, «упитанный поросенок» на продажу, день рождественских подарков в ассоциации фермеров, ярмарки, лагеря бойскаутов*» [14, с. 76] и пр.

Погружая читателя в мир повседневности, автор дает достаточно зримое и емкое описание изысканного убранства комнаты представительницы высшего английского сословия середины XX века: «*Сквозь высокие окна потоки солнечных лучей, рассеиваемые бесконечными оборками итальянских кружев. На трюмо щетки и расчески фирмы Фаберже. Флакончики духов от Лалик украшены разноцветными браслетами из темного и светлого янтаря, маленькая плитка и серебряный чайник стояли наготове для утреннего чая. Серебряный портсигар лежал около ручного зеркальца, на тыльной стороне которого был вытеснен образ Флоры с картины Боттичелли «Весна»*» [14, с. 170]. Столь изящное и тщательное описание не только оттеняет утонченный вкус героини, отношение к ней автора, это свидетельство своеобразия элитарной культуры английской аристократии.

Художественная литература, в ее лучших образцах, во все времена выполняла важные человекотворческие функции. Вряд ли в наш компьютеризированный информационный век книга превратится в «факультет ненужных вещей». Художественные тексты еще долго будут давать пищу для сердца и ума. Погружение в мир художественных образов (*образ*-ование) в рамках инженерного вуза видится вполне продуктивным, поскольку подобный синтез решает важную стратегиче-

скую задачу стабилизации общества как результат становления личности. Именно благодаря гуманитарной составляющей происходит органичное слияние, взаимное отождествление двух начал – духовного и материального. Доказано, что мир художественной литературы формирует гражданина, человека высокой культуры, расширяет грани инженерного творчества и обеспечивает оптимальную адаптацию выпускника вуза в условиях современной экономики и рыночных отношений. Учебные занятия в техническом вузе с привлечением гуманитарной составляющей, художественных текстов в частности, способствуют формированию у студенческой молодежи потребности в саморазвитии и самоутверждении как самостоятельного творческого субъекта культуры, определенного типа личности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тартт Д. Щегол: пер. с англ. М.: АСТ, 2015.
2. Панколь К. Желтоглазые крокодилы: пер. с фр. М.: АСТ, 2013; Черепаший вальс: пер. с фр. М.: АСТ, 2013; Белки в Центральном парке по понедельникам грустят: пер. с фр. М.: АСТ, 2014.
3. Кардапольцева В. Н. Женщина и женственность в русской культуре. Москва–Екатеринбург, 2000.
4. Шапинская Е. Н. Образ Другого в текстах культуры. М.: URSS, 2012; Шапинская Е. Н. Образы прошлого в (пост)современных репрезентациях // Культура и искусство. 2019. № 9. С. 70–82.
5. Фаулз Дж. Коллекционер: пер. с англ. М.: Эксмо, 2018.
6. Джордано П. Одиночество простых чисел: пер. с итал. М.: РИПОЛ-классик, 2009.
7. Роулинг Дж. К. Случайная вакансия: пер. с англ. М.: Иностранка, Азбука-Аттикус, 2013.
8. Кери П. Вдали от дома: пер. с англ. М.: Эксмо, 2018.
9. Киз Д. Цветы для Элджерона: пер. с англ. М.: Эксмо, 2016.
10. Си Лиза. Снежный цветок и заветный веер: пер. с англ. СПб: Аркадия, 2018.
11. Хоссейни Х. Бегущие за ветром: пер. с англ. М.: Фантом-Пресс, 2014; Хоссейни Х. И эхо летит за горами: пер. с англ. М.: Фантом-Пресс, 2015; Хоссейни Х. Тысяча сияющих звезд: пер. с англ. М.: Фантом-Пресс, 2016.
12. Швальбе Уилл. Книжный клуб конца жизни: пер. с англ. М.: Э, 2018.
13. Мин Джин Ли. Дорога в тысячу ли: пер. с англ. СПб: Аркадия, 2018.
14. Бредли А. Сладость на корочке пирога: пер. с англ. М.: АСТ, 2013.

Поступила в редакцию 2 марта 2020 года

Сведения об авторах:

Кардапольцева Валентина Николаевна – доктор культурологических наук, профессор, заведующая кафедрой художественного проектирования и теории творчества Уральского государственного горного университета. E-mail: kardapol@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-122-133

Humanities in a technical institution of higher education (by the example of modern fiction)

Valentina N. Kardapoltseva[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Modern rapidly advancing society requires engineers to be active and creative when solving engineering problems, be able to overcome stereotypes being guided by the needs of growing and changing economic reality, which is due to the demands of times and essential condition of the 21st century engineer formation. Modern education should not only be significantly updated with the range of information technologies, but also be guided by the idea of the synthesis of scientific knowledge and humanities where fiction is of no small importance.*

Research aim *is to integrate education and good breeding by means of fiction, form world view and need for personality rich in spirit, socially mobile with self-respect and able to fulfill personal abilities both in scientific and humanitarian directions.*

Methodology. *Hermeneutical method has been applied to analyze fiction by various authors and to interpret such notions as plot, idea, problems, and imagery. Empirical method material has been the fiction of different countries important by research goal and some striking features identification and comprehension. Contextual method has made it possible to delve into the contents of the analyzed literature.*

Results. *It has been proved that the world of fiction forms a citizen, a highly cultured person, promotes the development of heuristic thinking, aesthetic sense and ideals, extends the frontiers of engineering art and*

ensures new grad's adaptation in the conditions of economy and market relations. Fiction also promotes the formation of the students' need in personal growth and assertiveness as an independent creator and a particular personality.

Key words: *modern youth; literary texts; world view; foreign literature; integrator; problems.*

REFERENCES

1. Tartt D. *Goldfinch*: translation from English. Moscow: AST Publishing; 2015. (In Russ.)
2. Pancol K. *The yellow eyes of crocodiles*: translation from French. Moscow: AST Publishing; 2013; The slow waltz of turtles: translation from French. Moscow: AST Publishing; 2013; Central Park's squirrels are sad on Mondays: translation from French. Moscow: AST Publishing; 2013. (In Russ.)
3. Kardapoltseva V. N. *Woman and femininity in the Russian culture*. Moscow, Ekaterinburg; 2000. (In Russ.)
4. Shapinskaia E. N. *The image of another in the texts of the culture*. Moscow: URSS Publishing; 2012; Shapinskaia E. N. Images of the past in (post) modern representations. Kultura i iskusstvo = Culture and Art. 2019; 9: 70–82. (In Russ.)
5. Fowles J. *The collector*: translation from English. Moscow: Eksmo Publishing; 2018. (In Russ.)
6. Giordano P. *The solitude of prime numbers*: translation from Italian. Moscow: RIPOL-klassik Publishing; 2009. (In Russ.)
7. Rowling J. K. *The casual vacancy*: translation from English. Moscow: Inostranka, Azbuka-Attikus Publishing; 2013. (In Russ.)
8. Carey P. *A long way from home*: translation from English. Moscow: Eksmo Publishing; 2018. (In Russ.)
9. Keyes D. *Flowers for Algernon*: translation from English. Moscow: Eksmo Publishing; 2016. (In Russ.)
10. Liza See. *Snow flower and secret fan*: translation from English. St. Petersburg: Arkadiya Publishing; 2018. (In Russ.)
11. Hosseini K. *The kite runner*: translation from English. Moscow: Fantom-Press Publishing; 2014; Hosseini K. *And the the mountains echoed by*: translation from English. Moscow: Fantom-Press Publishing; 2015; Hosseini K. *A thousand splendid suns*: translation from English. Moscow: Fantom-Press Publishing; 2016. (In Russ.)
12. Schwalbe W. *The end of your life book club*: translation from English. Moscow: E Publishing; 2018. (In Russ.)
13. Min Jin Lee. *A thousand li road*: translation from English. St. Petersburg: Arkadiya Publishing; 2018. (In Russ.)
14. Bradley A. *Sweetness at the bottom of the pie*: translation from English. Moscow: AST Publishing; 2013. (In Russ.)

Received 2 March 2020

Information about authors:

Valentina N. Kardapoltseva – DSc (Culturology), Professor, Head of the Department of Artistic Design and the Theory of Art, Ural State Mining University. E-mail: kardapol@mail.ru

Для цитирования: Кардапольцева В. Н. Гуманитарная составляющая в техническом вузе (на примере современной художественной литературы) // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 4. С. 122–133. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-122-133
For citation: Kardapoltseva V. N. Humanities in a technical institution of higher education (by the example of modern fiction). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 4: 122–133 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-4-122-133

Поздравляем с юбилеем Голика Владимира Ивановича

Доктор технических наук, профессор кафедры горного дела Северо-Кавказского горно-металлургического института Голик Владимир Иванович родился 1 мая 1940 г. в станице Васюринская Динского района Краснодарского края. С 1 по 6 класс учился в пос. Судоверфь Камчатской обл. В 1957 г. окончил с золотой медалью среднюю школу в с. Трехсельское Успенского района Краснодарского края.

В 1962 г. окончил Северо-Кавказский горно-металлургический институт, получив звание «горный инженер» по специальности «Разработка месторождений полезных ископаемых». Начал трудовую деятельность на Садонском свинцово-цинковом комбинате, где в 1962–1966 гг. прошел ступени горного линейного надзора: горный мастер, начальник участка, заместитель главного инженера рудника. В 1966–1990 гг. работал на горных предприятиях Первого главного управления Министерства среднего машиностроения СССР в должностях: начальник участка, главный инженер рудника, заместитель начальника ПТО Целинного горно-химического комбината (Казахстан), начальник ПТО Приаргунского горно-химического комбината (г. Краснокаменск Читинской обл.), главный инженер рудоуправления № 4 Целинного горно-химического комбината (п. Красногорск Тургайской обл.).

В период освоения урановых месторождений северного Казахстана участвовал в разработке технологий добычи руд, в частности, с управлением состоянием массива закладкой пустот твердеющими смесями из отходов горного и смежных производств, технологии добычи металлов выщелачиванием, создании и освоении буровой и доставочной техники нового поколения с электрогидрофицированным приводом и др.

Принимал участие в общественной деятельности, был членом Президиума общества «Знание» Казахской ССР и председателем общества «Знание» г. Степногорска Казахской ССР.

Без отрыва от производства защитил кандидатскую диссертацию «Исследование и усовершенствование систем разработки и технологии очистной выемки рудных тел средней мощности со сложной морфологией», Москва, 1974, ВНИИХТ; докторскую диссертацию «Технологии погашения выработанного пространства с сохранением земной поверхности при разработке сложно-структурных месторождений», Москва, 1990, МГРИ.

В 1991 г. В. И. Голик на альтернативной основе был избран деканом горно-геологического факультета Северо-Кавказского горно-металлургического института, где работал в течение 15 лет. С 2006 по 2008 г. работал заведующим кафедрой технологии разработки месторождений. В настоящее время – профессор этой кафедры.

Принимал активное участие в разработке и осуществлении проектов горного направления, например проходке Зарамагского водопроводного комплекса. Направления научной деятельности: управление состоянием рудовмещающих массивов при добыче руд, добыча металлов подземным, кучным и скважинным выщелачиванием, утилизация отходов горной добычи и переработки с повышением качества компонентов подготовкой в активаторах, проходка горных выработок скоростными темпами, горная экология, природоохранная техника и технология, экономика недропользования. Основатель направления утилизации отходов переработки руд с извлечением металлов выщелачиванием в дезинтеграторе.

Автор более 1000 научных трудов, в том числе 70 монографий, учебников и учебных пособий, 35 патентов и свидетельств на изобретения, 4 поэтических сборников и книг «Горняки урановой империи» и «Осетия глазами друга».

Действительный член Российской академии горных наук, Российской академии естественных наук, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности. Член диссертационных советов СКГМИ, ЮРГТУ и ГГНТУ. Выпустил 40 докторов и кандидатов наук.

В. И. Голик – заслуженный деятель науки Российской Федерации и РСО–Алания. Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Полный кавалер знака «Горняцкая слава». Ветеран атомной промышленности. Почетный член Союза горняков и металлургов Саксонии. Заслуженный профессор ЮРГТУ, ЮИМ, Экибастузского ИТИ, СКГТУ. Действительный член РАГН, РАЕН, МАНЭБ. Член редколлегии журналов «Известия ТулГУ», «Известия ТПГУ», «Устойчивое развитие горных территорий», «Безопасность труда в промышленности», «CSITA» (Украина), «Строительная механика инженерных конструкций и сооружений», «Известия УГГУ», «Маркшейдерия и недропользование», «Актуальные проблемы горного дела», «Вектор геонаук».

В. И. Голик – федеральный эксперт научно-технической сферы. Имеет награды: медаль в ознаменование 100-летия со дня рождения В. И. Ленина, 1970, знак «Победитель социалистического соревнования», 1973, медаль имени В. А. Легасова, 1999, орден «Звезда ученого» (МАНЭБ), 2002, медаль «100 лет профсоюзам России», 2008.

Уважаемый Владимир Иванович! В день своего 80-летнего Юбилея примите наши искренние поздравления и пожелания долгих лет жизни и новых творческих свершений!

Коллектив Северо-Кавказского горно-металлургического института
Уральский государственный горный университет
Редакция издания «Известия вузов. Горный журнал»

Поздравляем с юбилеем Гальянова Алексея Владимировича

4 июня 2020 г. исполнилось 80 лет Алексею Владимировичу Гальянову – горному инженеру, доктору технических наук, профессору кафедры маркшейдерского дела Уральского государственного горного университета, действительному члену Академии горных наук.

Вся его производственная и творческая жизнь связаны с работой на кафедре маркшейдерского дела (1962–1972, с 2007 по настоящее время) и ИГД УрО РАН (1972–2007).

А. В. Гальянов известен горной общественности страны как крупный ученый и специалист в области горных наук и рационального недропользования. Круг научных интересов Алексея Владимировича – гносеологические аспекты горной науки, теоретические проблемы технологии рудоподготовки минерального сырья при добыче, вопросы полноты и качества извлечения запасов полезных ископаемых при отработке месторождений, теоретические вопросы геометризации технологических процессов в горном производстве, оценка данных разведки и геометризация месторождений, оценка сырьевой базы горных предприятий, история развития научных идей в горном деле, философские проблемы в науках о Земле. Он автор более 200 научных работ, наиболее значимые результаты которых освящены в 140 статьях, 20 монографиях и учебных пособиях, в том числе: «Закономерности сегрегации при складировании скальных пород и руд на карьерах ОАО «Комбинат Магнезит» (1997), «Трансформация структуры горных массивов при взрывных работах на карьерах» (1998), «Оценка гомогенности при смешивании кускового рудного материала» (1998), «Рудоподготовка на карьерах» (2000). Современные проблемы сырьевой базы минерального сырья рассмотрены в монографиях в соавторстве с В. Л. Яковлевым «Методологические аспекты стратегии освоения минеральных ресурсов» (2003) и «Сырьевая база промышленного комплекса черной металлургии» (2006). Развитию новых идей посвящена монография «Теоретические основы геометризации технологических процессов в горном деле» (2010); в 2014 г. вышла книга «Развитие научных идей в горном деле. Геометрия недр», а в 2019 г. в этой же рубрике – «Маркшейдерия» (в соавторстве с В. А. Гордеевым), в которых автор систематизировал сведения о возникновении и становлении этих научных дисциплин.

Под руководством и при непосредственном участии А. В. Гальянова реализовывалась программа МЧМ СССР 1974–1986 гг. по разработке методических указаний по нормированию, планированию и учету потерь руды черных металлов на территории Урала, Сибири, Казахстана, проводились исследования по усреднению руд на карьерах ССГПО, Качканарского, Костомушского, Коршуновского, Сорского, Лисаковского и других предприятий, установлены закономерности формирования внутренней структуры отвалов горных пород.

Теоретические и прикладные исследования, выполненные А. В. Гальяновым, явились базой для формирования теоретических основ геометризации технологических процессов в горном деле; им разработан алгоритм инженерного расчета внутренней структуры развала горных пород под воздействием взрывного разрушения на карьерах.

Научную деятельность А. В. Гальянов успешно совмещает с педагогической, передавая свои знания и опыт будущим горным инженерам-маркшейдерам. Им подготовлены 2 доктора и 4 кандидата технических наук, он член диссертационного совета по защите докторских диссертаций, член редакционной коллегии журналов «Маркшейдерия и недропользование» и «Маркшейдерский вестник», кавалер почетного знака «Горняцкая слава» трех степеней и «Шахтерская слава» III степени.

Горная общественность сердечно поздравляет Алексея Владимировича с юбилеем, желает ему крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов на благо горной науке и производству.

Уральский государственный горный университет
Редакция издания «Известия вузов. Горный журнал»

ЖУРНАЛ ПУБЛИКУЕТ СТАТЬИ В СЛЕДУЮЩИХ РАЗДЕЛАХ:

- **Геотехнология: подземная, открытая, строительная**
- **Геомеханика. Разрушение горных пород**
- **Физические и химические процессы горного производства. Аэрогазодинамика**
- **Горнопромышленная и нефтегазовая геология, геофизика**
- **Маркшейдерское дело, геодезия и кадастр**
- **Геоинформатика**
- **Обогащение полезных ископаемых**
- **Экономика и управление горным производством**
- **Геоэкология, рациональное природопользование**
- **Горная механика. Горные машины и транспорт**
- **Электрификация и автоматизация горных предприятий**
- **Безопасность горного производства**
- **Высшее горное образование**
- **История. Информация. Рецензии**

Требования к оформлению статей размещены на официальном сайте журнала: http://www.mining-science.ru

Р е д а к ц и я
Главный редактор Е. Ф. Цыпин
Зам. главного редактора Ю. И. Лель, М. Г. Бабенко
Ответственный секретарь Л. А. Решеткина
Редакторы Л. Г. Соколова, Л. Ю. Парамонова

Перевод И. В. Шайхутдиновой

Компьютерная верстка Ю. Б. Швецовой

Подп. в печать 19.06.2020. Дата выхода в свет 25.06.2020
Формат 70 x 108 1/16. Печать офсетная
8,5 усл. печ. л., 9,0 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ 6934
Цена свободная

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76015 от 19.06.2019 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций

Издатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30

Редакция «Известия вузов. Горный журнал»
г. Екатеринбург, пер. Университетский, 7, к. 4101
тел. (факс) (343) 257-65-59
E-mail: gornij_journal@ursmu.ru
http://www.mining-science.ru

Типография ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620078, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

Индекс 70367

ISSN 0536-1028. Известия высших учебных заведений. Горный журнал, № 4, 2020.