

eISSN 2500-0632

TOM
VOL. 6, № 2
2021



MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY (RUSSIA)

GORNYE NAUKI I TEKHNologii
ГОРНЫЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

MISIS



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



Activities of the *Mining Science and Technology (Russia) (Gornye nauki i tekhnologii)* international journal are aimed at developing international scientific and professional cooperation in the field of mining. The journal target audience comprises researchers, specialists in the field of mining, representatives of academic and professional communities.

The journal publishes original papers describing research findings, experience in the implementation of projects in mining industry, review publications.

The journal seeks to develop interdisciplinary areas that contribute to progress in mining, for example, technological and environmental safety, project organization and management in mining industry, development of territories, legal aspects of natural resource use, and other areas studied by researchers and practitioners. The journal always welcomes new developments. Papers are accepted in English or Russian.

EDITOR-IN-CHIEF

Vadim L. Petrov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

DEPUTIES EDITOR-IN-CHIEF

Oleg I. Kazanin, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National Mineral Resources University "University of Mines", St. Petersburg, Russian Federation

Svetlana A. Epshtein, Dr.Sci.(Eng.), National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Zach Agioutantis, Ph.D., Prof., University of Kentucky, Lexington, Kentucky, USA

Maksim Bogdasarou, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Brest State A.S. Pushkin University, Brest, Belarus

Xuan Nam Bui, Dr.Sci., Prof., Hanoi University of Mining and Geology, Duc Thang – Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

Carsten Drebenstedt, Ph.D., Prof., Freiberg University of Mining and Technology, Freiberg, Germany

Akper Feyzullaev, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Institute of Geology and Geophysics of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

Monika Hardygora, Ph.D., Prof., Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland

Nikolae Ilias, Dr.Sci.(Eng.), Prof., University of Petrosani, Petrosani, Romania

Vladislav Kecojevic, Ph.D., Prof., Benjamin M. Statler College of Engineering and Mineral Resources, West Virginia University, Morgantown, West Virginia, USA

Aleksey A. Khoreshok, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir I. Klishin, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Institute of Coal, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Kemerovo, Russian Federation

Vladimir N. Koshelev, Dr.Sci.(Chem.), Prof., National University of Oil and Gas "Gubkin University" (Gubkin University), Moscow, Russian Federation

Vladimir A. Makarov, Dr.Sci.(Geol. Mineral.), Prof., Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Oleg S. Misnikov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Tver State Technical University, Tver, Russian Federation

Valery V. Morozov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Bakhadirzhan R. Raimzhanov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Uzbekistan Research, Design and Survey Institute for Geotechnology and Nonferrous Metallurgy – O'zGEORANGMETLITI, Tashkent, Uzbekistan

Bayan R. Rakishev, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Alma-Ata, Kazakhstan

Oscar Jaime Restrepo Baena, Ph.D., Prof., National University of Colombia, Medellín, Colombia

Alexander N. Shashenko, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National Mining University, Dnipro, Ukraine

Vadim P. Tarasov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Denis P. Tibilov, Dr.Sci.(Econ.), Prof., Moscow State Institute of International Affairs (University) under the Ministry of Foreign Affairs of Russia, Moscow, Russian Federation

Niyaz Valiev, Dr.Sci.(Eng.), Prof., The Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

Yuri G. Agafonov, Cand.Sci.(Eng.), Ass. Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Michael R. Filonov, Cand.Sci.(Eng.), Ass. Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Leonid A. Plaschansky, Dr.Sci.(Eng.), Prof., National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

Yuri I. Razorenov, Dr.Sci.(Eng.), Prof., Platov South-Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Russian Federation

EXECUTIVE SECRETARY

Daria P. Galushka, National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

QUARTERLY

FOUNDED in 2016

REGISTRATION

The journal science and applied research journal is registered by the Federal Service for Communication, IT and Mass Communication Control on August 10, 2015. Registration Certificate E-No. ФС77-62652

INDEXATION

EBSCO, DOAJ, ПИНЦ, ВИНИТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.

FOUNDER AND PUBLISHER



The National University of Science and Technology MISIS (NUST MISIS)

CONTACT

4 Leninsky Prospect, Moscow 119049, Russian Federation

Phone: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



This work is licensed under a
Creative Commons Attribution 4.0 License.



Деятельность научно-практического журнала «Горные науки и технологии» (Mining Science and Technology (Russia)) направлена на развитие международного научного и профессионального сотрудничества в области горного дела.

Целевая аудитория журнала – исследователи, специалисты в области горного дела, представители академического и профессионального сообществ.

В журнале публикуются оригинальные статьи, описывающие результаты исследований, опыт реализации проектов в горнопромышленном комплексе, обзорные публикации.

Журнал стремится развивать такие междисциплинарные направления, как технологическая и экологическая безопасность, организация и управление проектами в горной промышленности, развитие территорий, правовые аспекты использования природных ресурсов и другие, которые способствуют прогрессу в горном деле и реализуются исследователями и практиками.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Петров Вадим Леонидович, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ЗАМЕСТИТЕЛИ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Казанин Олег Иванович, д.т.н., проф., Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Эпштейн Светлана Абрамовна, д.т.н., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Агиутантис Зак, д-р наук, проф., Университет Кентукки, г. Лексингтон, Кентукки, США

Богдасаров Максим Альбертович, д.г.-м.н., проф., Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина, г. Брест, Беларусь

Буи Нам Хуан, д-р наук, проф., Ханойский университет горного дела и технологии, Ханой, Вьетнам

Валиев Нияз Гадым оглы, д.т.н., проф., Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

Дребенштетт Карстен, д-р наук, проф., Технический университет Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Германия

Илиаш Николае, д.т.н., проф., Университет Петрошани, г. Петрошани, Румыния

Кецоджевич Владислав, д-р наук, проф., Институт инженерного дела и минеральных ресурсов им. Бенджамина М. Статлера Университета Западной Вирджинии, Моргантаун, Западная Вирджиния, США

Клишин Владимир Иванович, д.т.н., проф., Институт угля Сибирского отделения Российской академии наук, г. Кемерово, Российская Федерация

Кошелев Владимир Николаевич, д.х.н., проф., Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

Макаров Владимир Александрович, д.г.-м.н., проф., Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация

Мисников Олег Степанович, д.т.н., проф., Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Российская Федерация

Морозов Валерий Валентинович, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Раимжанов Бахадиржан Раимжанович, д.т.н., проф., Узбекский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт геотехнологии и цветной металлургии «O'zGEORANGMETLITI», г. Ташкент, Узбекистан

Ракишев Баян Ракишевич, д.т.н., проф., Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, г. Алма-Ата, Казахстан

Рестрепо Базна Оскар Хайме, д-р наук, проф., Национальный университет Колумбии, г. Медельин, Колумбия

Тарасов Вадим Петрович, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Тибиллов Денис Петрович, д.э.н., проф., Московский государственный институт международных отношений (Университет) Министерства иностранных дел России, г. Москва, Российская Федерация

Фейзуллаев Акпер Акпер оглы, д.г.-м.н., проф., Институт геологии и геофизики (ИГГ) Национальной Академии Наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Хорешок Алексей Алексеевич, д.т.н., проф., Кузбасский государственный технический университет им. М.С. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Шашенко Александр Николаевич, д.т.н., проф., Национальный горный университет, г. Днепр, Украина

Хардигора Моника, д-р наук, проф., Вроцлавский технологический университет, Вроцлав, Польша

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Агафонов Юрий Григорьевич, к.т.н., доц., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Плащанский Леонид Александрович, к.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

Разоренов Юрий Иванович, д.т.н., проф., Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Филонов Михаил Рудольфович, д.т.н., проф., НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Галушка Дарья Петровна, НИТУ «МИСиС», г. Москва, Российская Федерация

ПЕРИОДИЧНОСТЬ 4 раза в год

ОСНОВАН в 2016 году

РЕГИСТРАЦИЯ

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций 10 августа 2015 года.

Свидетельство о регистрации Эл № ФС77-62652.

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

EBSCO, DOAJ, РИНЦ, ВИНТИ РАН, Dimensions, BASE, J-Gate, Jisc Library Hub Discover.



Журнал открытого доступа.

УЧРЕДИТЕЛЬ И ИЗДАТЕЛЬ



Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

АДРЕС УЧРЕДИТЕЛЯ И ИЗДАТЕЛЯ

119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

КОНТАКТЫ РЕДАКЦИИ

Адрес: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

Телефон: +7 (495) 955-00-77

e-mail: send@misis.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



CONTENTS

MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

- Formation of synthetic structures and textures of rocks
when simulating in COMSOL Multiphysics 65
A. S. Voznesensky, L. K. Kidima-Mbombi

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

- Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy..... 73
M. N. Ignatyeva, V. V. Yurak, A. V. Dushin, V. E. Strovsky
- Methods and models for creating a market 4PL operator based on a logistics division
of a large industrial holding company 90
K. Zh. Kudaibergen

GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

- Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions
of Garadagh field / underground gas storage (Azerbaijan) 105
A. A. Feyzullayev, A. G. Gojayev

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

- Mining industry in Mozambique 114
J. J. Z. Caixao

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

- Research, assessment and proposals on resolving power quality problem
for the power supply system of Lam Dong alumina refinery, Vietnam 121
Thanh Lich Do

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling
with a flexible disk-type element..... 128
R. S. Melezhik, D. A. Vlasenko
- Substantiation of performance indicators of mine monorail locomotives..... 136
K. A. Ryabko, V. O. Gutarevich

PROFESSIONAL PERSONNEL TRAINING

- Personnel training for the mining and geological sector of Russia 144
A. A. Vercheba



СОДЕРЖАНИЕ

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

- Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics 65
А. С. Вознесенский, Л. К. Кидима Мбомби

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

- Техногенные минеральные образования: проблемы перехода к циркулярной экономике.... 73
М. Н. Игнатьева, В. В. Юрак, А. В. Душин, В. Е. Стровский

- Методы и модели создания рыночного 4PL-оператора на базе логистического подразделения крупного промышленного холдинга 90
К. Ж. Кудайберген

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан) 105
А. А. Фейзуллаев, А. Г. Годжаев

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Горнодобывающая промышленность Мозамбика 114
Ж. Ж. З. Кайшау

ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

- Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам..... 121
Тхань Лич До

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа 128
Р. С. Мележик, Д. А. Власенко

- Обоснование технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов 136
К. А. Рябко, В. О. Гутаревич

ПОДГОТОВКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России..... 144
А. А. Верчеба



MINING ROCK PROPERTIES. ROCK MECHANICS AND GEOPHYSICS

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>**Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics**

A. S. Voznesensky , L. K. Kidima-Mbombi

NUST "MISIS", Moscow, Russian Federation

al48@mail.ru**Abstract**

Rock texture and structure play an important role in the formation of the rock physical properties, and also carry information about their genesis. The paper deals with the simulation of geometric shapes of various structures and textures of rocks by the finite-element method (FEM). It is carried out by programmed detailing of the element properties and their spatial location in the simulated object. When programming structures, it is also possible to set the physical properties of various parts of the model, grids, initial and boundary conditions, which can be changed in accordance with the scenarios for numerical experiments. In this study, on the basis of FEM, simulation of various structures and textures of rocks with inclusions and disruptions was implemented in COMSOL Multiphysics in conjunction with Matlab. Such structures are used to conduct computer generated simulations to determine physical properties of geomaterials and study the effect on them of agents of various physical nature. The building of several models was considered: a rock specimen with inclusions in the form of ellipses of equal dimensions with different orientations; a sandstone specimen containing inclusions with high modulus of elasticity in cement matrix when deforming; a limestone specimen with fractures filled with oil and saline water when determining its specific electrical resistance. As an example of a fractured structure analysis, the influence of the filler on the electrical resistance of the limestone specimen containing a system of thin elliptical predominantly horizontal fractures was considered. The change in the lines of current flow at different ratios between the matrix and the fracture filler conductivities and their effect on the effective (averaged) conductivity of the rock specimen was clearly demonstrated. The lower conductivity of the fracture filler leads to increasing the length and decreasing the cross-section of the current flow lines that, in turn, leads to significant decrease in the conductivity of the fractured rock specimen. The higher filler conductivity results in a slight increase in the conductivity of the fractured specimen compared to that of the homogeneous isotropic specimen. The resulting structures can be used for numerical experiments to study physical properties of rocks.

Key words

rocks, geomaterials, physical properties, fractures, inclusions, numerical simulation, synthetic structures, texture, acoustic properties, electrical properties

Acknowledgments

The study was carried out with financial support of the Russian Foundation of Fundamental Research (RFFR) (scientific project No 20-05-00341).

For citation

Voznesensky A. S., Kidima-Mbombi L. K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):65–72. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД. ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

Научная статья

Формирование синтетических структур и текстур горных пород при их моделировании в среде COMSOL Multiphysics

А. С. Вознесенский , Л. К. Кидима Мбомби

НИТУ «МИСИС», г. Москва, Россия

al48@mail.ru**Аннотация**

Текстура и структура горных пород играют существенную роль в формировании их физических свойств, а также несут информацию о генезисе. В статье рассматривается моделирование методом конечных элементов (МКЭ) геометрических форм различных структур и текстур горных пород. Оно осуществляется путем программной детализации свойств элементов и их пространственного расположения в моделируемом объекте. При программировании структур возможно также задание физических



свойств различных частей модели, сеток, начальных и граничных условий, которые могут изменяться в соответствии со сценариями проведения численных экспериментов. В работе на основе МКЭ реализуется моделирование в COMSOL Multiphysics в связке с Matlab различных структур и текстур горных пород с включениями и нарушениями. Такие структуры используются для проведения компьютерных экспериментов по определению физических свойств геоматериалов и исследованию влияния на них воздействий различной физической природы. Рассмотрены построения нескольких моделей: образца горной породы с включениями в форме эллипсов равных размеров с различной ориентацией; образца песчаника, содержащего включения с высоким модулем упругости в цементирующей матрице при его деформировании; образца известняка при определении его удельного электрического сопротивления с трещинами, заполненными нефтью и минерализованной водой. В качестве примера анализа трещиноватой структуры рассмотрено влияние заполнителя на электросопротивление образца известняка, содержащего систему тонких эллиптических трещин с преимущественно горизонтальным расположением. Наглядно показано изменение линий протекания тока при разных соотношениях между проводимостью матрицы и заполнителем трещин и их влияние на эффективную (усредненную) проводимость образца породы. Меньшая проводимость заполнителя трещин приводит к увеличению длины и уменьшению сечения линий протекания тока, что в свою очередь приводит к существенному снижению проводимости трещиноватого образца породы. Большая проводимость заполнителя имеет своим результатом незначительное увеличение проводимости трещиноватого образца по сравнению с однородным изотропным образцом. Полученные структуры могут быть использованы для проведения численных экспериментов по исследованию физических свойств пород.

Ключевые слова

горные породы, геоматериалы, физические свойства, трещины, включения, численное моделирование, синтетические структуры, текстура, акустические свойства, электрические свойства

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-05-00341)

Для цитирования

Voznesensky A.S., Kidima-Mbombi L.K. Formation of synthetic structures and textures of rocks when simulating in COMSOL Multiphysics. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):65–72. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-65-72>

Introduction

Rock texture and structure play an important role in the formation of a rock's physical properties and also carry information about their genesis. Therefore, scientists from different disciplines have an interest in studying these rock characteristics.

The history of the evolution of texture analysis (TA) was presented in the fundamental study by [1], which gave examples simulating the elastic properties of textured materials from multiphase specimens containing pores and fractures. Petrographic analysis was carried out by [2] to determine the structure, texture, composition, and presence of minerals in beach rock specimens from the islands of Japan and Indonesia. To optimise the parameters of hydraulic fracturing using two and three-dimensional numerical models, the matrix structure and heterogeneities of minerals with complicated geometry of intergranular contacts between them were taken into account [3]. The importance of studying texture as one of the key elements that determine the morphological features of rupture was noted in [4]. Studies of small-scale variations in mineralogical composition and texture associated with rock faults within the San Andreas continental transform fault zone were described in [5]. Crystallographic textures of specimens of granulite, amphibolite, schist and gneiss were measured, classified, and compared with similar textures of monomineral rocks in [6]. In [7], analysis of the crystal

structure, texture, and chemical composition of syn-kinematic phyllosilicates in fault zones was used to determine the mechanisms and stages of strains and conditions of fault activity. Replacing the models of the complex textures of most granular sedimentary rocks with a model of a granular effective medium, based on the physics of random sphere packing, was proposed in [8]. The physical properties of reservoir rocks containing oil, gas, or water depend on the rock mineral composition and texture, as noted in [9]. The texture and residual stresses in geological specimens were studied in [10]. The theory and simulation of the formation of new structures as a result of the contrast in rheological properties between layers of different textures were considered in [11].

A number of studies have been devoted to the quantitative assessment of textures using coefficients, as well as the establishment of their relationship with the physical and technological properties of rocks.

The texture coefficient was proposed by two Australian researchers, Howarth and Rowlands, in 1986 [12, 13] to quantify texture, taking into account the shape, size, and location of mineral grains that made up rocks, as noted in [14]. The relationship between a rock's engineering properties and texture has been investigated through examples of carbonate rocks [15]. Grain shape, elongation, orientation, roundness, packing density, porosity and matrix content were evaluated by the texture coefficient.



Specimens of Cretaceous carbonates, including grain size and percentage, matrix type, dolomite percentage and carbonate percentage were investigated in relation to compressive strength and Young's modulus [16]. Quantitative petrographic studies of the influence of the distribution of minerals and their sizes on the strength and other geotechnical properties of low-porosity volcanic rocks were discussed in [17]. The relationship between the texture coefficient and sinuosity of the matrix of a rock containing pores (on the one hand) and Young's modulus, ultimate strength, ultimate yield and shear modulus under uniaxial compression (on the other), was investigated in [18]. Experimental numerical simulation by the method of discrete elements and laboratory testing of granite specimens under uniaxial compression and Brazilian tests (for tensile strength) were performed in [19], to study the effect of the size and distribution of mineral grains on the strength and nature of microfractures in granite rocks. The influence of the pre-existing texture of natural fractures on the shape of the reservoir in the course of its hydraulic fracturing was studied in [20] using a block model of discrete elements. The influence of the mineral composition and texture of the rock on the slake durability index (Slake Durability, SDI), as well as the relationship between the SDI of some rocks and their engineering (geotechnical) properties were studied in [21]. The relationship between the texture and mechanical properties of various rocks was studied in [22]. The rock texture features were quantified using the texture coefficient. The developed model was applied to determine the rating of intact rock mass in the RMR rock mass classification.

A special place is occupied by methods of image processing and synthesis of structures to establish their relationships with the physical properties of rocks.

The study [23] was devoted to the automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. The publication [24] is devoted to the creation of petrographic images using thin sections and the quantitative determination of the spatial location of selected rock components using two-dimensional (2D) Fourier transform. The texture segmentation algorithm for digital images of borehole walls was discussed, based on the "texture energy" index, and allowed to automatically divide the recorded sequence into strata [25]. The use of the statistical texture model proposed by Ma and Gagalovich to create a synthetic image comparable to the original one, was described in [26]. The study by [27] was devoted to the automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. Stress-strain curves and rupture evolution processes in rocks, based on synthetic digital models under uniaxial compression that allowed the simulation of various structural details and heterogeneous diversity of the studied rocks, were studied in [28].

The pore network model was used in [29], to simulate diagenetic cycles of sedimentary reservoir rocks. An example of the use of two extended fracture criteria - the "nonlocal Coulomb-Mohr softening criterion" and the "multilayer criterion" - for simulating underground constructions and rock specimens in layered mica schist with overlying rocks of complex texture, was given in [30]. The textures of three different facies of diabase alteration were studied using microscopy and X-ray microtomography to calculate rock permeability by numerical simulation [31].

For the numerical simulation of various structures and textures of rocks with inclusions and fractures by the finite-element method in the COMSOL Multiphysics environment, the use of this software in conjunction with Matlab, on the basis of which this system was created, may be useful. The structures obtained in this way can then be used for carrying out computer generated simulations to determine physical properties of geomaterials and study the influences on them of the effects of diverse physical nature. The complexity and laboriousness of manually drawing such textures with a large number of structural elements, as well as with permanent changes in the course of performing a series of experiments, make this operation practically unfeasible.

The aim of the study was to develop a technology for the automated synthesis of structures and textures of rocks with random variations of given textural parameters, characteristic of natural geomaterials, for use in numerical experiments for determining the physical properties under diverse effects.

1. Research techniques

Finite-element simulation of geometric shapes of various structures and textures of rocks is carried out by means of drawing the elements and their placement within the simulated object using software. With this approach, it is also possible to set the physical properties of various parts of the model, grids, initial conditions and boundary conditions, which can change in accordance with the scenarios for conducting numerical experiments.

As an example of the formation of a structure created using a program written in Matlab codes, in COMSOL Multiphysics, we consider a fragment of a drawing of a rock specimen with inclusions in the form of ellipses [32]. The introduction of a random number generator makes it possible to obtain the uniqueness of each combination of geometric parameters and study the influence of random factors on the experiment results.

Code snippet

Code snippet	
clc	Initial operations
clear all	
clear fem	



fem.shape = 2;	
fem.sshape = 2;	
AT = 0.001;	Semi-major axis of the ellipse
BT = 0.0002;	Semi-minor axis of the ellipse
phi = 45;	Ellipse tilt
LX = 0.032;	Specimen width
LY = 0.064;	Specimen height
NX = 15;	Ellipses horizontal quantity
NY = 18;	Ellipses vertical quantity
YMIN=BT/3;	Y fields
XMIN=AT/3;	X fields
DX = (LX-2*XMIN)/(NX+1);	Distance between inclusions along X
DY = (LY-2*YMIN)/(NY+1);	Distance between inclusions along Y
r1 = rect2(LX,LY,'base','corner','pos',[-LX/2 -LY/2]);	Specimen formation
for j=1:NX	
display=j	
CX = -LX/2+XMIN+DX*(j);	
for i=1:NY	
CY = -LY/2+YMIN+DY*(i);	
k = (i-1)*NX+j;	
A=pi/2*random('Uniform',-1,1,1,1);	Tilt angle of ellipses from -90° to +90°
r{k} = ellip2(AT,BT,'pos',[CX CY],rot,A);	Formation of ellipses of inclusions
r1 = r1 - r{k};	Formation of structure
r1 = r1 + r{k};	
end;	
end;	
fem.geom = r1;	Structure building
display='femgeom'	
fem.mesh = meshinit(fem);	Grid formation
display='femmesh'	
fem.mesh = meshrefine(fem);	
display='meshrefine'	
figure, geomplot(fem)	Grid formation
fem.mesh = meshinit(fem,'report','off');	
fem.appl.mode = 'FIPPlaneStrain';	Selection of a COMSOL Multiphysics section
fem.appl.equ.f = {0 0 1};	
fem.appl.equ.c = 1;	
fem.appl.bnd.h = 1;	
fem = multiphysics(fem);	
fem.xmesh = meshextend(fem);	
fem.sol = femlin(fem,'report','off');	
figure	
postplot(fem,'tridata','u')	Grid generation

This code corresponds to the generation of the structure in 2D space. Similarly, the generation in 3D space can be carried out.

2. The Findings and Discussion

2.1. Demo example

The result of generating the structure in accordance with the above code is shown in Fig. 1. In this case, the inclines of the ellipses were randomly set and their size and position did not change. By setting a different number of ellipses and changing their size boundaries, the incline angle and positions, it was possible to obtain structures corresponding to different types of rocks.

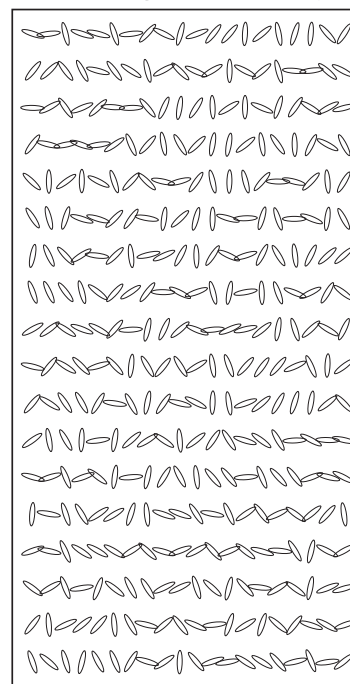


Fig. 1. The program code result

The resulting structures can be used for numerical experiments to study physical properties of rocks. We will now consider examples of such studies.

2.2. Generation of the structure of a sandstone specimen and simulating its uniaxial compression test (UCT)

We will consider the simulation of a sandstone specimen of dimensions 32×32×64 mm in the form of a rectangular prism with a square base. The specimen included high-modulus grain-inclusions with a structure of 6×18 grains, placed in cement matrix. Semi-axes of the grains were of the following sizes: a large one of 1.8 to 2.9 mm and a smaller one of 1.3 to 2.1 mm. Orientation angles of the main axis of the ellipses were ±90° from the horizontal direction. The model's elastic properties, elastic modulus E and Poisson's ratio ν are given in Table 1.

Table 1

Elastic properties of the model elements

Structure elements	E, GPa	ν
Cement	1	0.2
Grains	100	0.25

In the simulation, the boundary conditions were set under which vertical displacements of the lower end were prohibited and the displacement of the upper end was 0.1 mm downward, corresponding to the vertical compression of the specimen.

The results of calculating the stresses in the specimen are shown in Fig. 2a; Fig. 2b shows the curve of vertical normal stresses in the $y = 0$ cross-section. In this case, it was assumed that negative values corresponded to the compressive stresses.

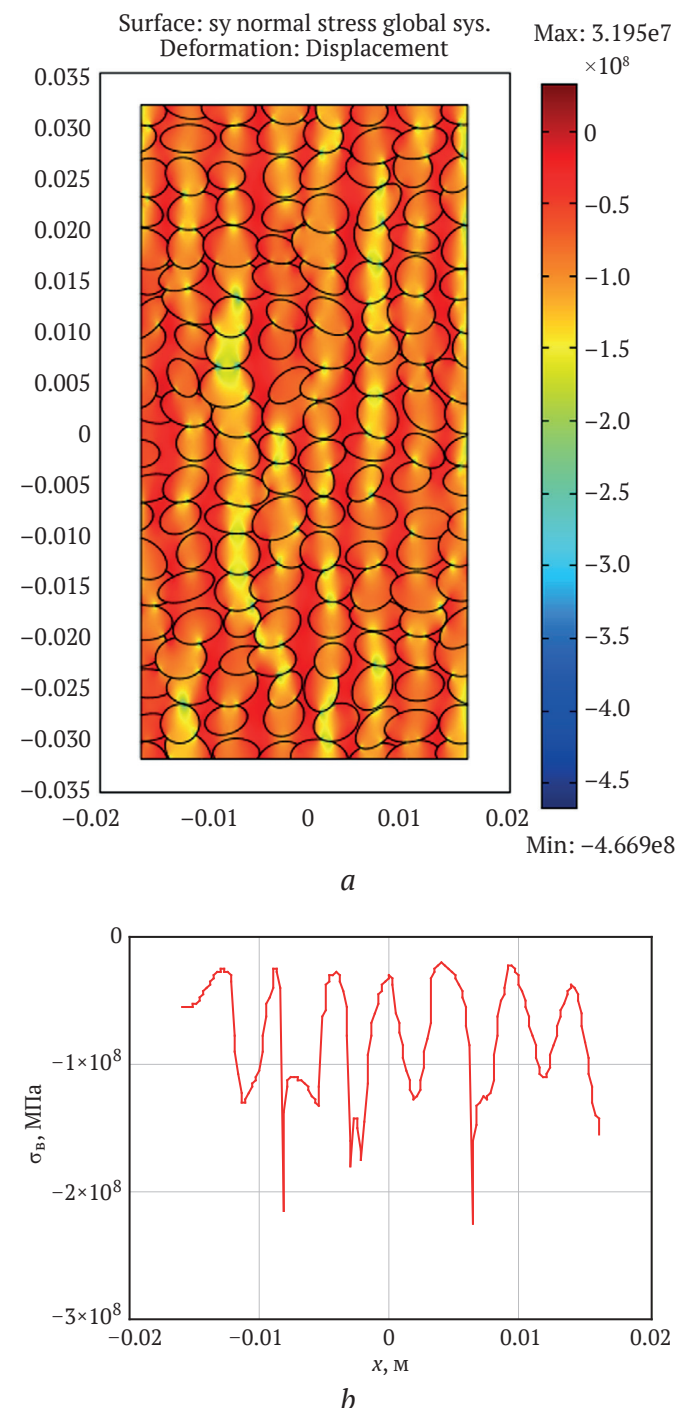


Fig. 2. The simulated structure of a sandstone specimen and distribution of vertical compressive stresses over the volume (a) and in the $y = 0$ cross-section (b) of the specimen

In Fig. 2a, the areas with the minimum compressive stresses (in absolute magnitude) are marked in red. The compression stresses at the grain contacts are marked in yellow, green, and blue. The areas of increased stresses, forming vertical chains, are marked in yellow. The maximum value of normal vertical stress in the $y = 0$ cross-section (in absolute magnitude) reached 223.8 MPa, and the average stress in this cross-section amounted to 77.0 MPa. The ratio of the maximum to average stress was 2.91. Large values of local stresses can cause destruction of the specimen's internal structure. If the specimen had a structure with a homogeneous modulus of elasticity, the compressive stresses averaged over the cross-section would not cause such a rupture.

2.3. Simulating horizontal fracturing in a limestone specimen

Another structure, simulating a system of fractures of horizontal, vertical or oblique orientation with the angles in a given range, can also be formed from ellipses. A system of elliptical fractures with a predominantly horizontal arrangement in a two-dimensional formulation of the problem is considered below.

The structure contained a network of elliptical fractures, arranged as 15 horizontal and 10 vertical rows with an incline of $\pm 40^\circ$ relative to the horizontal axis; the semi-major axis was 6×10^{-4} to 10.4×10^{-3} mm and the semi-minor axis was 1.2×10^{-4} to 2.8×10^{-4} mm. The deviations of the fracture centres from the uniform grid were ± 4.9 mm horizontally and $\pm 8 \times 10^{-2}$ mm vertically. The fractures were located in a rock specimen $32 \times 32 \times 64$ mm in size. When generating the size, incline and position of the ellipse centres, a random number generator with uniform distribution was used.

For the specimen of Cretaceous sediments, the rock conductivity was taken to be equal to the conductivity of limestone $\sigma_r = 10^{-4}$ Sm/m; the conductivity of water $\sigma_w = 10$ Sm/m; and the oil conductivity was taken to be 1×10^{-9} Sm/m. The values of conductivity of the media and the specimens are given in Table 2.

On the upper side of the specimen, a voltage of 100 V was set, relative to the lower side; the boundary condition of the lower side corresponded to ground. The simulation allowed us to obtain the distributions of the local current on the upper side of the specimen. In addition, in the course of the simulation, the lines of the electric current density were plotted, and the effective (averaged) specific electrical conductivity (EC) of the specimen was determined.

In the simulation, three cases were considered:

- 1) a homogeneous isotropic specimen without fractures;
- 2) a specimen with fractures filled with oil or air with low conductivity, less than the cement matrix conductivity;

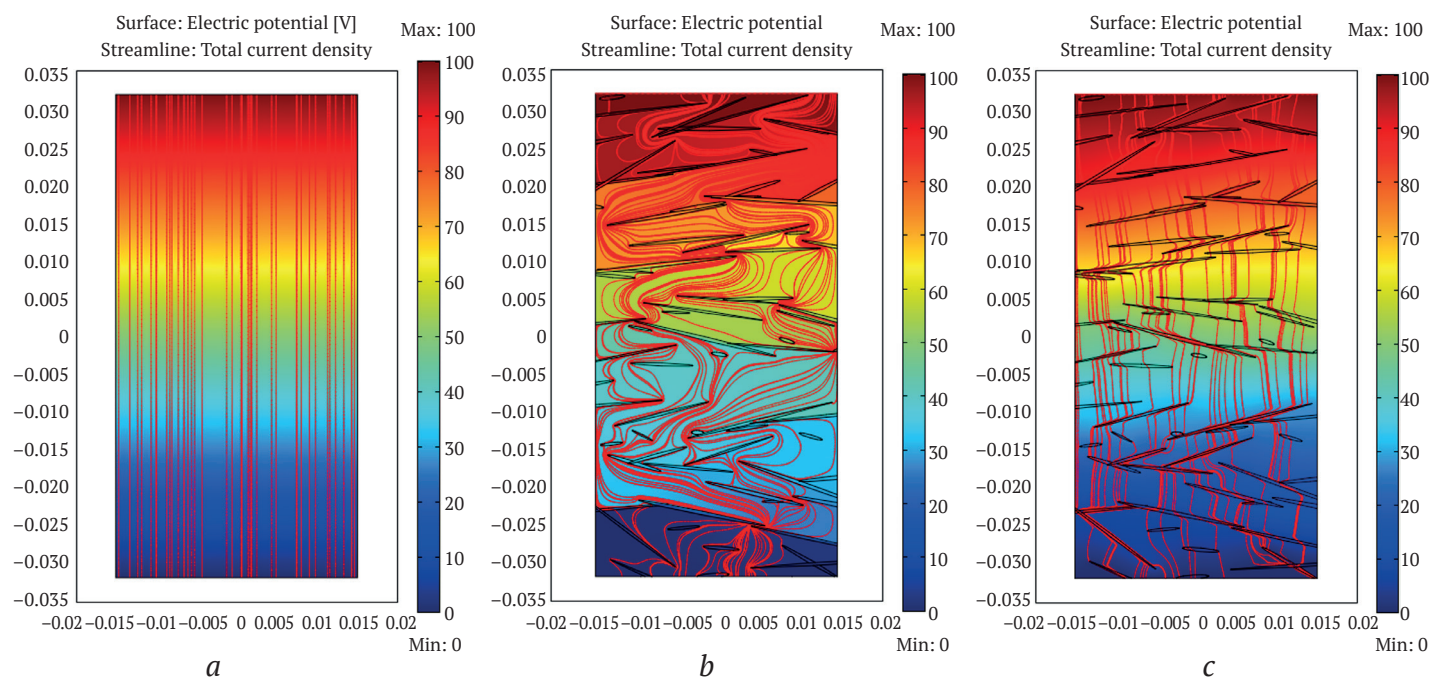


Fig. 3. Current flow lines for specimens: homogeneous isotropic (a); with fractures filled with oil or air (b); with fractures filled with conducting saline water (c)

3) a specimen with fractures filled with saline water with high conductivity, greater than the matrix conductivity.

The calculated results are shown in Fig. 3 and Table 2.

The initial and simulated conductivities of the media and specimens are presented in Table 2.

The conductivities of the media included in the model, as well as the averaged conductivities of the specimens: homogeneous isotropic; with fractures filled with oil or air; with fractures filled with conducting saline water

Medium	Homogeneous specimen	Fractures, oil	Fractures, saline water
Limestone	1×10^{-4}		
Fracture filling	–	1×10^{-9}	1×10^1
Specimen	1×10^{-4}	4.304×10^{-6}	1.376×10^{-4}

For the homogeneous isotropic limestone specimen in Fig. 3a, the current flow lines are linear and directed vertically. Following on from the data in Table 2, for this specimen, exactly the same value of electrical conductivity was obtained for the rock, which was taken when forming the model.

For the specimen with fractures filled with low-conductivity liquid or air (in Fig. 3b), the current flow lines are bent, increasing the current path and decreasing the cross-section, that leads to decreasing the specimen's effective conductivity by more than 10 times.

For the specimen with fractures filled with conducting saline water, the conductivity increases by almost 40% due to the partial flow of current through the liquid.

Conclusions

1. The approach to the numerical simulation of heterogeneous structures containing elliptical inclusions generated from the Matlab programme, in conjunction with COMSOL Multiphysics (where finite-element simulation is performed), is quite effective.

2. The possibilities of simulating sandstones containing high-modulus grain-inclusions placed in a cement matrix have been demonstrated. The solution of the problem of determining local stresses in a specimen with such a structure under uniaxial strain in the direction of the longest side was considered. It was shown that the local stresses significantly exceeded the values averaged over the specimen's cross-sectional width; elongated areas of increased stress were present, oriented along the straining direction.

3. As an example of a fractured structure analysis, the influence of the filler on the electrical resistance of a limestone specimen, containing a system of thin, elliptical, predominantly horizontal fractures was considered. The change in the lines of current flow at different ratios between the matrix and the fracture filler conductivities and their effect on the effective (averaged) conductivity of the rock specimen was clearly demonstrated. The lower conductivity of the fracture filler leads to increased length and decreased cross-section of the current flow lines that, in turn, leads to a significant decrease of the conductivity of the fractured rock specimen. The higher filler conductivity results in slightly increased conductivity of the fractured specimen compared to that of the homogeneous isotropic specimen.



References

1. Ivankina T. I., Matthies S. On the development of the quantitative texture analysis and its application in solving problems of the Earth sciences. *Physics of Particles and Nuclei*. 2015;46:366–423. <https://doi.org/10.1134/S1063779615030077>
2. Daryono L. R., Titisari A. D., Warmada I. W., Kawasaki S. Comparative characteristics of cement materials in natural and artificial beachrocks using a petrographic method. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019;78:3943–3958. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1355-x>
3. Nachev V. A., Kazak A. V., Turuntaev S. B. 3D digital mineral-mechanical modeling of complex reservoirs rocks for understanding fracture propagation at microscale. In: *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Petroleum Technology Conference 2020, RPTC 2020*. Society of Petroleum Engineers; 2020. <https://doi.org/10.2118/201979-MS>
4. Sangirardi M., Malena M., de Felice G. Settlement induced crack pattern prediction through the jointed masonry model. In: Carcaterra A., Paolone A., Graziani G. (eds.) *Proceedings of XXIV AIMETA Conference 2019. AIMETA 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41057-5_158
5. Bradbury K. K., Davis C. R., Shervais J. W., Janecke S. U., Evans J. P. Composition, Alteration, and Texture of Fault-Related Rocks from Safod Core and Surface Outcrop Analogs: Evidence for Deformation Processes and Fluid-Rock Interactions. *Pure and Applied Geophysics*. 2015;172:1053–1078. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-0896-6>
6. Nikitin A. N., Ivankina T. I., Ullemeyer K., Vasin R. N. Similar quartz crystallographic textures in rocks of continental earth's crust (by neutron diffraction data): II. Quartz textures in monophase rocks. *Crystallography Reports*. 2008;53:819–827. <https://doi.org/10.1134/S1063774508050167>
7. Abd Elmola A., Charpentier D., Buatier M., Lanari P., Monié P. Textural-chemical changes and deformation conditions registered by phyllosilicates in a fault zone (Pic de Port Vieux thrust, Pyrenees). *Applied Clay Science*. 2017;144:88–103. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.05.008>
8. Allo F. Consolidating rock-physics classics: A practical take on granular effective medium models. *The Leading Edge*. 2019;38(5):334–40. <https://doi.org/10.1190/tle38050334.1>
9. Hu X., Huang S. Physical Properties of Reservoir Rocks. In: Hu X., Hu S., Jin F., Huang S. (eds) *Physics of Petroleum Reservoirs*. Springer Geophysics. Springer, Berlin, Heidelberg. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55026-7_2
10. Frischbutter A., Janssen C., Scheffzük C., Walther K., Ullemeyer K., Behrmann J. H., et al. Strain and texture measurements on geological samples using neutron diffraction at IBR-2, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna (Russia). *Physics of Particles and Nuclei*. 2006;37:S45–S68. <https://doi.org/10.1134/S1063779606070033>
11. Hudleston PJ, Lan L. Rheological information from geological structures. *Pure and Applied Geophysics*. 1995;145:605–620. <https://doi.org/10.1007/BF00879591>
12. Howarth D. F., Rowlands J. C. Development of an index to quantify rock texture for qualitative assessment of intact rock properties. *Geotechnical Testing Journal*. 1986;9(4):169–179. <https://doi.org/10.1520/GTJ10627J>
13. Howarth D. F., Rowlands J. C. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1987;20:57–85. <https://doi.org/10.1007/BF01019511>
14. Azzoni A., Bailo F., Rondena E., Zaninetti A. Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 1996;29:39–46. <https://doi.org/10.1007/BF01019938>
15. Kamani M., Ajalloeian R. Evaluation of Engineering Properties of Some Carbonate Rocks Trough Corrected Texture Coefficient. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2019 Apr 15;37:599–614. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0630-8>
16. Ajalloeian R, Mansouri H, Baradaran E. Some carbonate rock texture effects on mechanical behavior, based on Koohrang tunnel data, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2017;76:295–307. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0861-y>
17. Ömer Ü., Florian A. Influence of micro-texture on the geo-engineering properties of low porosity volcanic rocks. In: *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 6: Applied Geology for Major Engineering Projects*. Springer International Publishing; 2015. P. 69–72. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09060-3_12
18. Song R., Zheng L., Wang Y., Liu J. Effects of Pore Structure on Sandstone Mechanical Properties Based on Micro-CT Reconstruction Model. *Advances in Civil Engineering*. 2020;2020: 9085045. <https://doi.org/10.1155/2020/9085045>
19. Zhou J., Zhang L., Yang D., Braun A., Han Z. Investigation of the quasi-brittle failure of alashan granite viewed from laboratory experiments and grain-based discrete element modeling. *Materials (Basel)*. 2017;10(7):835. <https://doi.org/10.3390/ma10070835>



20. Zhao X., Wang T., Elsworth D., He Y., Zhou W., Zhuang L., et al. Controls of natural fractures on the texture of hydraulic fractures in rock. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018;165:616–626. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.02.047>
21. Rahimi M. R., Mohammadi S. D., Beydokhti A. T. Effects of Mineral Composition and Texture on Durability of Sulfate Rocks in Gachsaran Formation, Iran. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2020;38:2619–2637. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01173-9>
22. Ozturk C. A., Nasuf E. Strength classification of rock material based on textural properties. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2013;37:45–54. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.005>
23. Wang L. Automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. *Mathematical Geology*. 1995;27:847–865. <https://doi.org/10.1007/BF02087099>
24. Prince C. M., Ehrlich R. Analysis of spatial order in sandstones. I. Basic principles. *Mathematical Geology*. 1990;22:333–359. <https://doi.org/10.1007/BF00889892>
25. Luthi S. M. Textural segmentation of digital rock images into bedding units using texture energy and cluster labels. *Mathematical Geology*. 1994;26(2):181–196. <https://doi.org/10.1007/BF02082762>
26. Ye S. J., Rabiller P., Keskes N. Automatic high resolution texture analysis on borehole imagery. In: *SPWLA 39th Annual Logging Symposium 1998*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts (SPWLA); 1998.
27. Wang L. Automatic identification of rocks in thin sections using texture analysis. *Mathematical Geology*. 1995;27:847–865. <https://doi.org/10.1007/BF02087099>
28. Xiao H, He L, Li X, Zhang Q, Li W. Texture synthesis: A novel method for generating digital models with heterogeneous diversity of rock materials and its CGM verification. *Computers and Geotechnics*. 2021;130:103895. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103895>
29. Algive L, Bekri S, Lerat O, Nader F, Vizika O. Reactive pore network modeling technology to evaluate the impact of diagenesis on the petrophysical properties of a rock. In: *Society of Petroleum Engineers – International Petroleum Technology Conference 2009, IPTC 2009*. 2009, pp. 3452–3461. <https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.151.iptc14049>
30. Kazerani T, Nilipour N, Garin E, Seingre G. Application of numerical modelling for large-scale underground excavation in foliated rock mass. In: *ISRM Regional Symposium, EUROCK 2015*. International Society for Rock Mechanics; 2015, pp. 931–936.
31. Coelho G., Branquet Y., Sizaret S., Arbaret L., Champallier R., Rozenbaum O. Permeability of sheeted dykes beneath oceanic ridges: Strain experiments coupled with 3D numerical modeling of the Troodos Ophiolite, Cyprus. *Tectonophysics*. 2015;644:138–150. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.01.004>

Information about the authors

Aleksandr S. Voznesensky – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, National University of Science and Technology “MISiS” (NUST “MISiS”), Moscow, Russian Federation; SPIN 5976-3030; ORCID 0000-0003-0926-1808; e-mail al48@mail.ru

Lemuel Ketura Kidima-Mbombi – PhD student, Department of Physical Processes of Mining and of Geocontrol, National University of Science and Technology “MISiS” (NUST “MISiS”), Moscow, Russian Federation

Received 11.05.2021

Revised 29.05.2021

Accepted 15.06.2021



EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research article

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>**Technogenic mineral accumulations:
problems of transition to circular economy**M. N. Ignatyeva , V. V. Yurak  , A. V. Dushin  , V. E. Strovsky 

Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation

 vera_yurak@mail.ru**Abstract**

The study hypothesis is determined by the statement that the identification of a set of issues covering all stages of introducing technogenic deposits into economic turnover will allow focusing on solving a set of complex problems associated with technogenic mineral accumulations (mining waste). The aim of the study was to identify problems requiring priority resolution, which, in turn, accelerated the transition to a circular economy (implementation of the concept of closed supply chains) in the context of handling technogenic mineral accumulations. In the course of the study, issues of legal nature were identified (caused by the absence of the legal status of technogenic deposits and the regulation of their use regime in the Federal Law of the Russian Federation “On Subsoil”). A number of aspects are due to the complexity and cost of development of technogenic deposits, which are rightfully classified as unconventional types of raw materials, and in most cases require state support (for involving in commercial exploitation) in the form of a system of economic incentives, the feasibility of which should be confirmed by newly-elaborated regulatory legal acts. State should use the tools of public-private partnership in solving waste problems, in particular, referring to the positively proven experience of implementing regional target programs for processing of technogenic mineral accumulations. Viability of transition to circular economy in the sphere of handling technogenic mineral accumulations depends on the timeliness of the identified problems solution.

Key words

technogenic deposits, technogenic mineral accumulations, waste, waste management, circular economy, public-private partnership

Acknowledgements

The study was prepared in accordance with the state assignment for the implementation of research work for the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ural State Mining University” No. 075-03-2021-303 dated December 29, 2020.

For citation

Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

**Техногенные минеральные образования:
проблемы перехода к циркулярной экономике**М. Н. Игнатъева , В. В. Юрак  , А. В. Душин  , В. Е. Стровский 

Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

 vera_yurak@mail.ru**Аннотация**

Гипотеза исследования определяется утверждением, что выявление комплекса проблем, охватывающих все этапы введения техногенных месторождений в хозяйственный оборот, даст возможность сосредоточить внимание на вопросах, связанных с техногенными минеральными образования-



ми (горнопромышленными отходами). Целью исследования является выявление задач, требующих первоочередного разрешения, что, в свою очередь, форсирует переход к циркулярной экономике (реализации концепции замкнутых цепей поставок) в условиях обращения с техногенными минеральными образованиями. В процессе исследования выявлены проблемы правового характера, обусловленные отсутствием в Федеральном законе Российской Федерации «О недрах» правового статуса техногенных месторождений и регламентации режима их использования. Ряд аспектов обусловлен сложностью и затратностью разработки техногенных месторождений, которые по праву отнесены к числу нетрадиционных видов сырья, и в большинстве случаев для использования требуют государственной поддержки в виде системы мер экономического стимулирования, возможность реализации которых должна быть подтверждена наличием проработанных нормативно-правовых актов. От государства требуется использование инструментов государственно-частного партнерства в решении проблем отходов, в частности, обращения к положительно зарекомендовавшему себя опыту реализации региональных целевых программ по переработке техногенных минеральных образований. Выявленные проблемы – далеко не последние, но от своевременности их решения зависит реальность перехода к циркулярной экономике в сфере обращения с техногенными минеральными образованиями.

Ключевые слова

техногенные месторождения; техногенные минеральные образования; отходы; обращение с отходами; циркулярная экономика, государственно-частное партнерство

Благодарности

Исследование подготовлено в соответствии с государственным заданием на выполнение НИР для ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» № 075-03-2021-303 от 29.12.2020.

Для цитирования

Ignatyeva M. N., Yurak V. V., Dushin A. V., Strovsky V. E. Technogenic mineral accumulations: problems of transition to circular economy. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):73–89. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-73-89>

Introduction

The problem of waste for our country and the world community as a whole is not new. The waste amount increase is caused, on the one hand, by increasing mineral extraction amounts due to permanently increasing demand for raw materials and decreasing grades of ores of primary deposits, and, on the other hand, by low mineral raw materials utilization rate. According to research of V.I. Petryanov-Sokolov, carried out in the 1970s, only 2 % of natural materials are processed into finished products. Currently, this indicator has increased, but very slightly, and amounts to 2–6 %. According to the approximate calculations of the authors [1], the following amount of wastes is accounted for 1 ton of mineral, t: 1) coal: underground mining: 0.25–0.35, open-pit mining: 5–7; 2) iron ores: 1.0–1.5 (up to 10.0); 3) manganese ores: 2–3 and more; 4) industrial minerals: 0.2–0.4; 5) nonferrous metal ores: 1–5.0 (up to 20), etc.

Many useful components are lost in waste, and, in addition, the waste occupies more and more areas of land resources and become sources of pollution of the atmosphere, water resources, soil, and subsequently biota and humans. Mining production is defined as land-intensive: while extracting 1 million tons of manganese ore, from 76 to 600 hectares are disturbed; for iron ore, from 14 to 640 hectares; for 1 m³ of non-metallic raw materials,

from 1.5 to 583 hectares; for 1 million tons of coal (underground mining), 4.4 hectares. The greatest alienation of lands from economic circulation and their transfer to industrial land category occurs in the course of open-pit mining, while in the structure of land use more than 75–80% of the total area are occupied by waste dumps and sludge storage facilities (TSFs). These facilities are especially dangerous in old industrial territories, including Sverdlovsk region, since, due to the growth of urban areas, in some cases the facilities prove to be within the city limits and become active sources of environmental degradation, affecting all elements of the biosphere. Mobile forms of heavy metals contained in them migrate in all directions, polluting water, soil, and plants. As a result, already at a distance of 9–10 km from the source of pollution, the ecological situation begins to deteriorate, which directly affects the population health [2–4].

Recently, the waste problem has become more sharp in connection with the completion of extracting reserves of deposits located in the central part of Russia with well-developed infrastructure, and the expediency of replenishing the mineral resource base at the expense of waste, the content of useful components in which often equals or even exceeds that in the ores of primary deposits [5]. At present, when the environmental aspect has been supplemented by



the economic one, the problem of waste has become a priority, as evidenced by the targets of a number of legislative documents¹ and broad support for the concept of closed supply chains, or, according to the modern trend, the concept of a circular economy, which in their content are synonyms) [6–10].

The modern stage is characterized by the change from the so far dominating linear model following the principle: “extracting – consuming – discarding”, to a fundamentally new model of circular economy, which is distinguished by: optimization of the production process, reuse or joint use of products, waste recycling. In March 2019, the European Commission approved the report on the circular economy action plan implementation, which reflected the existing achievements and formulated the tasks for the future [9]. The relevant documents, which reflected the circular economy integration, are European Green Deal [11] and COVID-2019 Recovery Plan [12]. These documents presents circular economy as an “urgent and irreversible global megatrend”, contributing to the creation of a “sustainable, low-carbon, resource-efficient and competitive economy” [12, p. 1]. N.V. Pakhomova, K. Richter and M.A. Vetrova [6] argue that the main approaches to the formation of closed supply chains are: maintenance, product reuse, product refurbishment and/or component recovery. At the same time, both the concept of “circular economy” itself and the principles on which this concept is based, are still issues of scientific debate. The authors prefer the interpretation presented in the study [13], where the scientists argue that the “circular economy” should include a new working economic model, promote the transition from a linear model to a closed cycle of economic activity and be based on principles that include at least reuse, recycling and recovery of waste, and, ideally, a kind of classification (hierarchy) of waste, in which the principle of “reducing the use of natural resources and reducing adverse environmental impact” prevails.

The mining activity specifics make its own adjustments to the implementation of the circular economy model. In a narrower sense, this model can be implemented only for ore deposits, which

account for 14.6% of the total extraction of minerals. In this case, the authors adhere to the opinion of K.N. Trubetskoy and Yu.P. Galchenko [14] on the impossibility of re-using nonmetallic raw materials, which forms the largest part of the flow coming from the lithosphere, as well as energy raw materials. For metal-containing waste, waste utilization methods such as recycling, recovery, and recuperation can be used. Recycling is the reuse of waste for its intended purpose; waste recovery involves the return of waste to the production cycle after a certain stage of preparation; recuperation provides for extraction of useful components. In the broad sense of the word, the circular economy model in essence corresponds to the resource saving model, which can be focused either only on mineral resources, or on all types of natural resources used in the development of subsoil resources (land, water, waste gases, etc.).

Despite the fact that the concept of circular economy is presented at this stage as an innovation, its origins can be traced back to the twentieth century. For instance, the problem of closed supply chains (circular economy) became an object of research in the 60s of the twentieth century. R. Parson calls for the collection of waste and their reuse (1969), calling this activity a “repeated cycle”, which prevents depletion of mineral raw materials. He also considers it expedient to increase commercial reserves of mineral raw materials through the use of ores with low grade of useful components. Due to decreasing grades of useful components in iron ores, the transition to the extraction of ferruginous quartzite happened, and ash content in extracted coal increased. A striking example is the change in the copper grade in the mined ores in the United States (at the beginning of the twentieth century, the average copper grade in the ores was 5%, while by 1950 it dropped to 0.9%).

By the beginning of the 1980s, scientific research was intensified in the field of clarification of the conceptual and categorical apparatus of low-waste and non-waste-free technologies, generalization of the experience of their use in various industries, including mining, substantiation of the prospects for the development of waste-free production and waste disposal, consideration of this problem from the standpoint of rational use of feedstock, as well as the development of methodological approaches to assessing the economic efficiency of waste use. Among the researchers, T.V. Grant [15], V.A. Zaitsev, A.P. Tsygankov [16], B.N. Laskorin, B.V. Gromov [17], L.A. Barsky, V.Z. Persits [18], V.I. Chalov [19] should be mentioned. In 1983, L.A. Barsky and K.G. Gromov led the development of a Temporary Standard Methodology for assessing the economic

¹ FZ “On Amendments to the Federal Law” On Production and Consumption Waste” dated 29.12.2014 No. 458-FZ. (In Russ.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_172948/; The strategy for the development of the industry for processing, utilization and disposal of production and consumption waste for the period up to 2030 dated January 25, 2018 No. 84r. (In Russ.). URL: <http://static.government.ru/media/files/y8PMkQGZLfbY7jhn6QMruaKoferAowzJ.pdf>; The strategy of environmental safety of the Russian Federation for the period up to 2025, approved by the Decree of the President of the Russian Federation of April 19, 2017 No. 176. (In Russ.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_215668/



efficiency of low-waste technological schemes for processing mineral raw materials, while a number of similar industry methods had already been approved.

S.N. Podvishensky, V.I. Chalov, and O.P. Kravchenko considered, in their work [1], the issues of waste-free production from the perspective of the formation of mining complexes. A.D. Vyvarets examined waste in detail in order to increase the efficiency of their involvement in the production cycle [20]; V.N. Umanets and A.V. Kogut paid attention to exploration, quality assessment, geometrization and differentiation of waste by quality [21]. In the 80s, a team of scientists of Industrial Economics Institute (the Ukrainian SSR Academy of Sciences) quite actively and fruitfully dealt with the problem of rational use of waste, including their certification. The technogenic deposit classification issues, their role in information systems of mineral raw materials were studied in the researches of K.N. Trubetskoy, V.N. Umanets, M.B. Nikitin [22], as well as Yu. M. Arsky and V.V. Chainikov [23].

In the 1990s – early 2000s, the problem of waste was mainly considered within the framework of the concept of cleaner or environmentally friendly production (EFP), without being specified for the conditions of the mining sector. The issues of waste management in the regional aspect and related research on the development of mechanism for economic incentives for waste recycling were considered by M.N. Ignatyeva, G. Yu. Pakhalchak [24], I.S. Belik [25]; development of environmental entrepreneurship, by L.Ya. Yandyganov [26], development of the foundations for the theory and calculation of the parameters of such technologies, by K.N. Trubetskoy, A.G. Shapar [27], systematic assessment of technogenic mineral resources, by V.V. Chainikov [28]. The studies characterizing the mineral resource base represented by technogenic mineral accumulations were implemented by V.P. Konyaev, L.A. Kryuchkova, E.S. Tumanova [29], E.S. Tumanova, A.N. Tsibizov et al. [30], S.N. Mormil, V.L. Salnikova, L. Amosova et al. [31]. In the last decade, the following studies should be highlighted: Yu.A. Podturkin, V.A. Kotkin, R.Kh. Muslimov, R.N. Salieva [32], as well as V.B. Agafonov [33], which considered the legal support of economic activities in the field of the use of technogenic deposits; the study of S.M. Popov on the justification of waste uses [34]; L.Z. Bykovsky and L.V. Sporykhin, considering technogenic deposits from the perspective of expanding the mineral resource base [5]; S.G. Seleznev, touching upon the complexity of involving technogenic deposits in economic turnover [35]; B. I. Benevolsky, A.I. Krivtsova, A.I. Romanchuk, B.K. Mikhailova, considering the specifics of the economic and

environmental aspects of mining and industrial waste utilization [36]; V.N. Umanets, who set out the methodology and experience of geological and technological assessment of technogenic gold formations at some deposits of Kazakhstan [37]; Yu.A. Kiperman and M.A. Komarov, which discussed the role of mining and industrial waste in the resource-saving development of the mineral resource complex [38]; as well as studies on the development of the circular economy concept of foreign authors [39–41] and its adaptation for Russian conditions - by domestic authors [6, 42]. The experience of implementing the concept using the “from bottom to top” method² [43] and “from top to bottom” [44] is subject to consideration. Moreover, there is a wide range of views and opinions in the world literature on the circular economy issues concerning the essence of the circular economy concept and basic principles [49], mechanisms of state regulation of the circular economy (the so-called “state regulation packages” [13] and their optimality [46, 47]); development and analysis of integration strategies for the circular economy [9, 48, 49] and some practical aspects of the circular economy application, including specific regulation mechanisms, issues of adjusting flows of resources and materials, “circular” technological innovations [50], and even techniques for teaching the very concept of circular economy [51], and so on.

Thus, the analysis of the studies carried out showed that they were characterized by the breadth of the subject matter, differences in the elaboration of individual issues and, at the same time, the lack of comprehensiveness in identifying problems impeding the implementation of resource-saving policy in mineral resource sector in the context of circular economy that predetermined the relevance and goal setting of the research performed. The purpose of this work was to identify problems requiring priority resolution for facilitating the transition to circular economy (implementation of the concept of closed supply chains) in the context of the treatment of technogenic mineral accumulations in the Russian Federation.

The initial condition for substantiating the subject of the research in the paper was an approach to the model of closed supply chains, i.e. the use of ore deposit exploitation wastes, or, more precisely, technogenic deposits (TD). As for the location of the studied targets, then from the environmental viewpoint, these were old industrial areas, where previously large-scale development of subsoil resources took place (for example, the Sverdlovsk and Chelyabinsk regions), as well as the northern and Arctic territories, whose fragile ecosystems were disturbed at the slightest

² Arctic industry and circular economy cluster. URL: <https://arcticsmartness.eu/arctic-industry/>



anthropogenic impact. Economically, these were TDs of strategic raw materials, as well as those that were located near metallurgical works and processing plants and could act as sources of raw materials that were in short supply for them.

Research Methodology

The hypothesis was determined by the statement that identifying a set of problems covering all stages of introducing TDs into economic circulation would make it possible to focus on eliminating bottlenecks and accelerate the implementation of resource-saving policies in relation to mineral resource sector based on MPW (mining-and-processing waste).

The methodological basis of the research included general scientific methods: historical, dialectical, abstract-logical, as well as methods of analysis, synthesis, comparison and analogies. Among the approaches used are system-based and evolutionary ones. The information base was composed of materials from the Ministry of Natural Resources and Ecology of Russia and its territorial divisions, the Federal State Statistics Service, regulatory legal acts and methodological documents, as well as the results of research by foreign and domestic scientists on the topic under consideration.

Findings and Discussion

Legal status of technogenic deposits

It should be noted that the concept of TD has long been recognized by the scientific community. According to the dictionary-reference book “this is an accumulation of mineral substances on the surface of the Earth or in mine workings, formed as a result of their separation from the rock mass and storing in the form of waste of mining, processing, metallurgical and other productions and suitable in terms of quantity and quality for commercial use as raw materials”³. The definition⁴ clarifies the types of waste and indicates the need for processing with an economic effect. Surprising is the fact that the State Reserves Committee (GKZ) recognizes the presence of TDs, classifications of TDs are being developed [22], databases are created, while this concept is

still absent in legislative documents, same to in the Federal Law “On Production and Consumption Waste”, although it was already introduced in the Model Law “On Production and Consumption Wastes” of 2007⁵. At the same time, the concept of “TD” was enshrined in the first edition of the regional law “On Production and Consumption Waste” (Sverdlovsk region, 1997)⁶, it is also present in the legislation on mineral resources of the Republic of Kazakhstan⁷, and in the legislation of Uzbekistan⁸. This concept was introduced into the Law “On Subsoil” of the Republic of Tatarstan, into the “Instruction on the Application of the Mineral Reserves Classification to TDs Generated by the Coal Production in the Rostov Region”.

Development of MPW deposits (i.e. TDs), on the one hand, in the Federal Law “On Subsoil”⁹ is equalized with deposits of primary raw materials (organization of auctions and tenders for the transfer of the right to use them, conclusion of a service contract with a professional mining-rescue service etc.). On the other hand, in the Federal Law “On Production and Consumption Waste”, MPW (mining-and-processing waste) is not separated into special units, but is considered simply as production waste, for processing of which it is necessary to have this waste in ownership. This condition simplifies the process of developing TDs, but does not comply with the provisions of the Federal Law “On Subsoil”, where waste processing is one of the types of subsoil use, while the subsoil is in state ownership (Articles 1–2 of the Federal Law “On Subsoil”). Historical “ownerless” waste is also the property of the state.

⁵ The Model Law “On Production and Consumption Waste” (new version) adopted at the 29th plenary session of the Interparliamentary Assembly of the CIS Member States (Resolution No. 29-15 of October 31, 2007) (In Russ.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/902092609>

⁶ Law of the Sverdlovsk Region “On Production and Consumption Waste” dated December 19, 1997. Adopted by the Regional Duma of the Legislative Assembly of the Sverdlovsk Region on December 3, 1997. URL: <https://docs.cntd.ru/document/801104148>

⁷ “On subsoil and subsoil use”. Code of the Republic of Kazakhstan dated December 27, 2017 No. 125-VI 3PK. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K1700000125>

⁸ Law of the Republic of Uzbekistan dated September 23, 1994, 2018-XII “On Subsoil” (New edition, approved by the Law of the Republic of Uzbekistan dated December 13, 2002 No. 444-II). URL: [https://buxgalter.uz/ru/doc?id=34547_zakon_respubliki_uzbekistan_ot_23_09_1994_g_2018-xii_o_nedrah_\(novaya_redakciya_utverjdena_zakonom_ruz_ot_13_12_2004_g_nate\)](https://buxgalter.uz/ru/doc?id=34547_zakon_respubliki_uzbekistan_ot_23_09_1994_g_2018-xii_o_nedrah_(novaya_redakciya_utverjdena_zakonom_ruz_ot_13_12_2004_g_nate))

⁹ Law of the Russian Federation “On Subsoil” dated 02.21.1992 No. 2395-1. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_343/

³ Krivtsov A.I., Benevol'skiy B.I., Minakov V.M., Morozov I.V. *Terms and concepts of domestic subsoil use: glossary*. Yatskevich B.A. (ed.). Moscow: CJSC Geoinformmark Publ.; 2000. (In Russ.).

⁴ Methodological guideline for the study and environmental and economic assessment of technogenic deposits. GKZ under the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation. Moscow: 1994. (In Russ.).



As a result, at present time, the MPW management regulation is carried out in accordance with the Federal Law “On Subsoil”, which implies huge payments, being sometimes commensurate with the profit from the TD development, to fulfill all the conditions related to geological exploration, approval of reserves, conclusion of contracts when a TD is recognized as hazardous industrial facility (HIF), etc. It follows from the above that there is an urgent need to determine the legal status of TDs in the Federal Law “On Subsoil” and the legal regime of their use. Until TDs are equalized in the legislation with natural deposits, the problem of their processing will remain unresolved, especially since, due to the peculiarities of the conditions of occurrence, composition and properties, development of TDs usually requires individual technologies/methods and equipment meeting the criteria of the best available technologies (BAT). This all significantly decreases potential profitability of corresponding TD investment projects, the implementation of which turns out to be unfeasible without state support. It is also required to specify in the Federal Law “On Production and Consumption Wastes” that the Law provisions do not apply to MPW, since MPW is regulated by the Federal Law “On Subsoil” in order to avoid misunderstandings and confusion.

Information support for handling technogenic deposits

Information about TDs, their location, source of accumulation, technogenic indicators (reserves, shape, grain size distribution, strength, etc.) is necessary to accelerate the involvement of waste in recycling. A correctly developed TD classification will become a basis for purposeful approach to the assessment and design of TD development, accelerated solving the problems of circular economy within the framework of mining sector. Analysis of the available classifications indicates that they reflect: the waste aggregative state (liquid, gaseous, solid); storage time (current, historical); danger level (toxicity, explosion hazard, infectivity and other properties). At the same time, all of them have a significant drawback connected with the lack of information on the economic feasibility of waste use, which was not avoided by the current regional cadastres of production and consumption waste, although back in 1987 in the sectoral methodology of cadastres for accounting for mining/processing/metallurgical waste (from non-ferrous metallurgy enterprises), the cadastres were named economic, since, in addition to the initial indicators characterizing waste, they contained a large list

of economic indicators confirming the feasibility of TD processing. However, the methodology did not pay due attention to processing technology. Calculations of economic efficiency allow dividing TDs into three groups: 1) the use of which is expedient at the present time, 2) development is planned in the near future, and therefore the waste is subject to conservation, and 3) the use of which is impractical. The analysis of the current cadastres of production and consumption waste [52] showed that they contained information about the subject, the register of waste disposal facilities with more than 60 indicators presented in the form “Characteristics of waste disposal facilities”, each of which was retrieval that allowed receiving information on various parameters. Data on legal entity – entrepreneurs carrying out activities for detoxication and disposal of waste, and data on techniques/installations for the use of waste are provided in the cadastres. This information concerns not only operating, but also decommissioned facilities; however, the cadastres do not contain data characterizing waste from the standpoint of the mineral resource base reserve.

Information about TDs is contained in the cadastre of mineral deposits and occurrences, while information in the cadastre of production and consumption waste for TDs doesn't allow separating TDs from other wastes used by nature users. There is no systematized information about TDs in the public domain, although attempts to study and evaluate them have been made more than once. For instance, at the end of the 80s of the XX century, PGO “Uralgeologiya” performed work on the preparation of geological and economic overview including assessment of potential use of waste from mining, metallurgical and fuel and energy industries. In 80–90s of the XX century, technological research and economic assessments related to mining waste disposal were carried out at such large enterprises of the Urals as Vysokogorsky GOK, Kachkanarsky GOK, NTMK OJSC, SUMZ OJSC, Svyatogor OJSC, BAZ, UAZ, etc. In 2002, a team of geologists under the leadership of S.I. Mormil summarized the data on accounting and processing of solid waste located within the Middle Urals, and also assessed their environmental hazard [31]. As the recuperation potential (that is, the possibility of additional extraction of useful components) of associated useful components in the technogenic mineral accumulations in the Sverdlovsk region, the following quantitative indicators for the facilities, shown in Fig. 1, can be considered.

Table 1 shows the specific facilities taken into account when drawing up the diagram, according to [31].

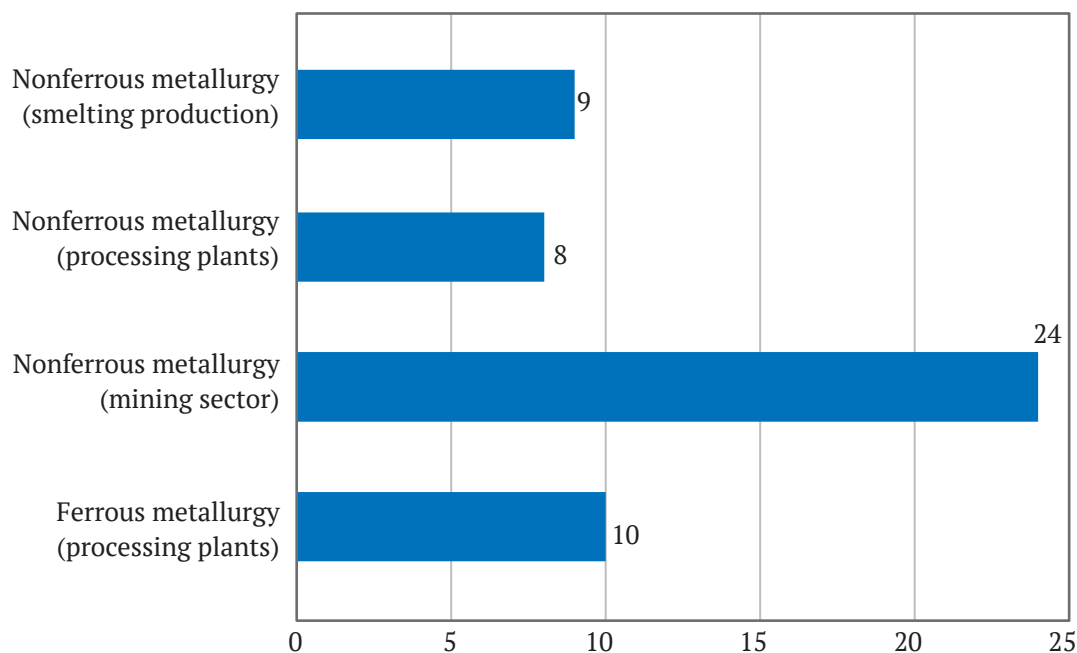


Fig. 1. Recovery potential of the Sverdlovsk region

Table 1

**Technogenic mineral objects in the Sverdlovsk region,
forming the recovery potential**

Industry	Production	Enterprises	Waste type	Amount of waste, tons
Ferrous metallurgy (useful components: Fe, TiO ₂ , V ₂ O ₂ , Co, Sc, Cu, Zn)	Beneficiation production	OJSC Bogoslovsky RU	Crushing and screening plant (DSF) tailings	98.8
		OJSC Kachkanarsky GOK	Sludge from Magnetic Concentration Plant (MCP)	916,025.0
		OJSC Goroblagodatskoe RU	Sludge dump at Polovinka River	32,000.0
			Sludge dump at the Salda bog	47,552.0
		OJSC Vysokogorsky GOK	MCP beneficiation tailings, Cheremshanskoe sludge dump	36,718.0
			Zapadny open pit, MCP tailings	4,157.0
			Severo-Lebyazhinsky open pit, MCP tailings	2,300.4
			Kamensky open pit, MOF tailings	4,173.0
		OJSC Pervouralsky RU	Beneficiation tailings	14,148.0
			Sludge from sewage sump	540.0
TOTAL (ferrous metallurgy, beneficiation production)			1,057,712.2	
Non-ferrous metallurgy (useful components: Cu, Zn, Fe, S, Pb, Au, Ag)	Mining sector	OJSC Krasnoufimsk Copper Smelting Complex	Kabansky Mine, host rocks	3,732,000.0
			Chernushinsky Mine, host rocks	6,160,000.0
			Krasnogvardeisky Mine, host rocks	308,000.0
			Novolevinsky Mine, host rocks	187,600.0
		OJSC Volkovsky Mine	Off-balance ores	565,400.0
			Oxidized ores	3,168,300.0



End of Table 1

Industry	Production	Enterprises	Waste type	Amount of waste, tons
		III International SESchmidt Mine and Chadar Mine, host rocks	Shmidt and Chadar Mines, host rocks	173,900.0
			Severo-Olkhovskaya Mine, host rocks	112,600.0
			Yuzhno-Olkhovskaya Mine, host rocks	91,100.0
			Kapitalnaya Mine, host rocks	119,900.0
			15 years of October Mine, host rocks	243,900.0
			Sernaya Mine, host rocks	235,000.0
		OJSC Kirovograd Copper Smelting Complex (KCSK)	Levikhinsky Mine, host rocks (11 holes)	5,860,800.0
			Lomovsky Mine, host rocks	186,200.0
			Karpushinsky Mine, sludge from sewage and mine waters	22,300.0
			Belorechensky Mine, sludge from mine waters	166,400.0
			Levikhinsky Mine, sludge from mine waters	2,129,100.0
			Lomovsky Mine, sludge from mine waters	421,100.0
			Sulfuric acid plant of KCSC, sludge collector (mothballed)	167,100.0
			Sulfuric acid plant of KCSC, sludge collector (operating)	446,300.0
		OJSC Degtyarsky RU	Kapitalnaya Mine 1, 2, host rocks	4,464,000.0
			Elchevsky settling pond, sludge from mine waters	460,700.0
			Zyuzelsky settling pond, sludge from mine waters	44,000.0
		OJSC Safyanovskaya med'	Overburden	11,023,000.0
		TOTAL (nonferrous metallurgy, mining sector)		40,488,700.0
	Mining and Beneficiation Production	OJSC Krasnouralsk Copper Smelting Complex	Processing plant, historical beneficiation tailings (Sor'insky sludge pond)	8,742,000.0
			Current beneficiation tailings	6,734,400.0
		Kirovgrad processing plant	Historical beneficiation tailings	22,565,700.0
			Current beneficiation tailings	7,848,700.0
		Sredneuralsk processing plant	Historical pyrite beneficiation tailings	17,019,300.0
			Current beneficiation tailings	8,980,700.0
		OJSC Uralelectromed	Pyshma processing plant, historical beneficiation tailings	2,887,000.0
		OJSC Berezovsky Mine	Beneficiation tailings	16,941,800.0
		TOTAL (ferrous metallurgy, mining and beneficiation production)		91,719,600.0
	Metallurgical Production	OJSC Krasnouralsk Copper Smelting Complex	Reverberatory furnace slags, casting slags	513,500.0
			Historical granular slags	10,257,400.0
			Current granular slags	4,518,900.0



End of Table 1

Industry	Production	Enterprises	Waste type	Amount of waste, tons
		OJSC Kirovograd Copper Smelting Complex (KCSK)	Current shaft furnace slags (dumps 1, 2)	15,008,000.0
			Current shaft furnace slags	5,757,500.0
			Pyrite cinder, dump 1	785,500.0
			Pyrite cinder, dump 2	3,763,700.0
		OJSC Sredneuralsky Copper Smelter	Historical reverberatory furnace slags	12,654,400.0
			Current reverberatory furnace slags	8,301,000.0
		TOTAL (nonferrous metallurgy, mining and beneficiation production)		61,559,900.0

Thus, based on the data presented in Table 1 and Fig. 2, it should be noted that nonferrous metallurgy is in the lead in terms of the volume of waste generated (subject to recycling), in which processing (beneficiation) sector takes the first place, metallurgical production takes the second place, and mining sector takes the third place.

It was found that only a small portion of MPW has been studied geologically in order to identify, assess and approve their reserves, i.e. we can only talk about potential TDs.

The databank maintained since 2004 [52] contains information on 686 types of waste. A special problem is connected with ownerless “historical” waste, the value of which from the standpoint of forming mineral resource base reserve decreases due to long-term storage. They are considered most often as objects that pollute the environment, worsen the ecological situation, i.e. as objects of direct accumulation of environmental damage. According to the Order of the Russian Federation Government of 04.12.2014 No. 2462-r, 340 similar objects were identified in

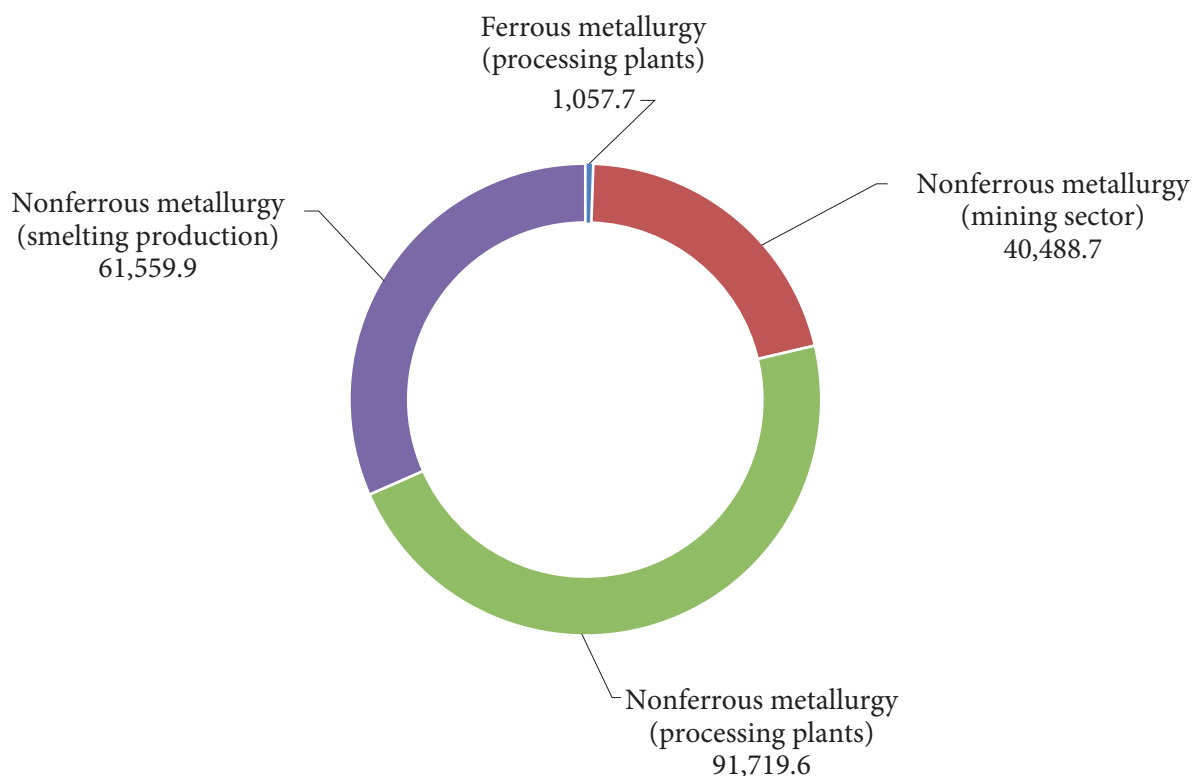


Fig. 2. Quantitative assessment of the volume of technogenic mineral accumulations in the Sverdlovsk region



Russia. The share of former TDs among which is unknown [53]. The number of ownerless objects in the territory of the Sverdlovsk region is 30, although most likely this figure requires clarification¹⁰. In the management of “historical” waste, the ecological aspect comes to the fore, since mineral raw material aspect in this situation almost loses its meaning. We believe that TD cadastre containing the most complete information about the objects, including economic information, allows obtaining reliable statistical information for making decisions regarding the use of TDs and intensifying this activity. It should not be forgotten that there is a large number of potential TDs in the country, reserves and resources of which have not been estimated, and there are numerous examples of this fact.

Licensing and assessment of TDs

According to the Federal Law “On Subsoil”, it is necessary to obtain a license for the use of MPW, unless otherwise provided by a license for the extraction of the main mineral. Most often, a subsoil user, the owner of a license for the extraction of a mineral, is entitled to both exploration and processing of the resulting waste, BUT located within the boundaries of the mining lease allocated to the subsoil user. The need to obtain a separate license appears on the condition that the subsoil user either does not use current waste, or admits violations in the organization of this process noted during the inspection. If there is a historical waste within the boundaries of the mining lease, which falls into the licensing program, its processing requires obtaining a separate license, while the subsoil user exploiting this mining lease receives the preferential right to develop the TD. At the same time, the procedure for obtaining the right in accordance with the requirements of the Federal Law “On Subsoil” should be carried out through auctions (tenders), which is very problematic, especially for those that are included in the list of strategic raw materials, i.e. subsoil plots are of federal importance. The curiosity of the situation arises due to the fact that the decision on exploration and production of minerals in this case should be made only at the level of the Government of the Russian Federation. The list of licensed objects for TD development is usually formed by the Rosnedra territorial division; however, given the environmental hazard of a number of them, the list of the objects includes those that require immediate liquidation.

Obtaining the license is the first step in implementing waste recycling activities. The next step is a complicated and expensive procedure – geological assessment of MPW, which is assumed to be implemented similarly to natural deposits. The only regulatory document continues to be¹¹, recommending to carry out exploration using drilling of boreholes, sinking test pits, excavating trenches, which are subject to sampling. At the same time, exploration experience shows that reliability of sampling turns out to be low, since the large-block MPW material is sampled by small-size samples.

According to S.G. Seleznev, the sole reliable assessment criterion under these conditions is the results of pilot commercial development only, which is carried out by no means always [35]. He also notes the high cost of both geological exploration and the procedure of including the reserves on the state balance sheet (certification). The appraisal of TDs, which have already been included in the state balance sheet, was carried out in accordance with the requirements for comprehensive appraisal of reserves, first established in the “Temporary requirements for the calculation of associated minerals and components in ores and other types of mineral raw materials” in 1973. Later, the accumulated experience was reflected in the “Requirements for integrated study of deposits and estimation of reserves of associated minerals and components” (1982), which included a special section “Requirements for the study of waste from the main production” and a subsection “Requirements for the geological and economic appraisal of associated solid minerals”.

According to the requirements, a deposit exploration provides for preliminary geological and economic appraisal of the overburden rocks and the implementation of detailed exploration with the reserve estimation. If these surveys were not executed during the exploration period, then according to the “Requirements for integrated study of deposits and estimation of reserves of associated minerals and components”, the obligation to conduct these surveys falls on the deposit operator. The first appraisals of TDs as sources for obtaining mineral components were carried out in the 1930s in the Sverdlovsk Region. In 1931–1937, the dumps of the Turinsky mines were appraised for copper; in the same period, the copper-containing dumps of most enterprises in the Urals were also appraised. The appraisal work continued

¹⁰ Strategy for the industrial waste management in the territory of the Sverdlovsk region up to 2030, approved by Decree of the Government of the Sverdlovsk region of 09.09.2014, No. 774-PP. (In Russ.).

¹¹ Methodological guideline for the study and environmental and economic assessment of technogenic deposits. GKZ under the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation. Moscow, 1994. (In Russ.).



in 1956 and 1970s–1980s. Then their execution was terminated.

Unjustified indifference prevents the authorities from making changes to the legislative and regulatory framework regarding TDs being totally unlike natural deposits. TDs, according to scientists, at the initial stage of development can even be considered as unconventional raw materials, since “their development is innovative in nature and accompanied by increased costs and risks compared to traditional types of raw materials” [54]. This once again confirms the need for a differentiated approach to the use of TDs.

At the same time, the performed appraisal of TD for confirmation of reserves requires certain improvement based on modern realities. First, it concerns technologies that must comply with the best available technologies, introduction of which is determined by the Federal Law “On Amendments to the Federal Law” On Environmental Protection “and Certain Legislative Acts of the Russian Federation” dated July 21, 2014 No. 219-FZ. A list of BAT application areas, including mining sector, was approved by Order of the Government of the Russian Federation of 24.12.2014 No. 2674-r. Among them is the handling of overburden and host rocks. The second important point is the assessment of environmental hazard of waste, their impact on the environment. The recommendations of the regulatory document¹² are rather short; the provisions of the systematic approach to TD appraisal set forth in [28] are of better validity, although they do not take into account those changes in the calculation of prevented damage that are connected with socio-economic [55] and ecosystemic [56, 57] approaches to development of subsoil resources. When all the components are taken into account and assessed, the prevented damage turns out to be incomparably greater [58], than its estimated value using the methodology approved back in 1987. First of all, this concerns the underestimation of the value of biota ecosystem services, recovered after elimination of a technogenic source of environmental impact/damage. The dynamics of changes in the environmental impact in connection with changing state of waste with time due to transition of insoluble compounds and minerals into soluble forms owing to oxidation during filtration of atmospheric precipitation (containing free oxygen and acid solutions) through them also remains not taken into consideration.

¹² Methodological guideline for the study and environmental and economic assessment of technogenic deposits. GKZ under the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of the Russian Federation. Moscow; 1994. (In Russ.).

From the above, it follows that it is necessary to study the technology of environmental transformation under the influence of mining industry. It is possible to use the ecological and geochemical principle, according to which the current “activity of technogenic loads determines material composition of water and air flows entering natural-territorial complexes (landscapes), depending on the content of sulfides and other active chemical elements and the aggregative state” [24]. All types of MPW in this case can be divided into geochemically hazardous and non-hazardous to the environment.

When appraising a TD, in contrast to natural objects, the environmental factor is of no less importance than the economic one that is reflected in the name of the appraisal performed: environmental-and-economic. This is primarily related to geochemically hazardous waste.

On the whole, it should be noted that a differentiated approach should be applied to the study, geological-and-economic appraisal, including in the state balance sheet and development of technogenic objects that differ in scale, mineral species types and ways of generation. Differentiated approaches should also be envisaged in relation to current and historical waste, large-block and sludge accumulations, mixed and differentiated waste storage, etc.

How the government can help

It follows from the foregoing that a TD development is a complicated and expensive business with high economic and environmental risks. In the current situation characterized by the lack of motivation to involve waste in the economic turnover, enterprises naturally choose more profitable strategy of actions, consisting in refusal to process waste, preferring to pay for negative environment impact caused by waste placement. At the same time, all researchers involved in the development of technogenic deposits confidently declare the need for state support in the form of a system of economic incentive measures for implementation of a program for processing of solid waste, all the more so as such mechanisms worked successfully in the 1980s. The economic mechanism in the field of waste management functioning in 2021, including the economic measures implemented in this area at the level of the regions of the Russian Federation, cannot be called sound.

The result of the review of domestic and foreign studies [59] on the problem of MPW processing for increasing the level of environmental safety, improving quality of the environment and preserving non-renewable resources was preparing a number of recommendations regarding the types of effective government assistance, which, in turn, will make it



possible to intensify the process of MPW recycling by business.

1. “Implementation of state dedicated subsidy for development of environmentally friendly processing technologies, incl. BAT, waste detoxication and disposal, as well as interest subsidies to facilitate the use of borrowed funds.

2. Subsidized government lending and borrowing for equipment that ensures an environmentally friendly technological process for processing MPW; tax credits for introduction of new technologies (this practice is common in the USA) [60].

3. Preferential taxation (full or partial): exemption from taxation of commodity products produced and sold through extraction from MPW; exemption from taxation of a part of the profit of enterprises reinvested in MPW processing; exemption from income tax for newly created productions/startups aimed at MPW processing for two years since the initial receiving of profit; reducing MET rates (exemption for 1.5–2.0 years when introducing new technologies, full exemption when introducing environmentally friendly technologies) when using MPW as raw material; reduction of rates or complete exemption from property tax for enterprises extracting and processing MPW (technogenic resources) for newly created productions/startups; reduction of land tax rates; reduction of rental rates for the use of buildings and structures being in municipal and regional ownership.

4. Concessional lending of investment projects (taking into account their ranking) for MPW processing and forming a regional pledge fund, the guarantor of which is the regional government for reducing the investment risk of banking structures financing MPW processing. There is a positive experience of offset of costs for the implementation of measures for MPW rational use, development and implementation of low-waste and resource-saving technologies at the expense of payments for negative impact on the environment, as well as decreasing customs duties and excise taxes on equipment used in MPW processing, detoxication, and disposal, if such equipment is not manufactured in Russia. The positive aspects include those benefits that are provided for by No. 219-FZ for performing modernization, including activities related to MPW management. These are the possibility of reimbursement of the interest rate on the investment loan through corresponding reducing income tax; accelerated depreciation for the best available technologies (BAT) equipment (in the USA, for example, the writing off period for treatment equipment is 5 years, in Canada, 2 years), as well as return to the practice of forming environmental protection funds (ecological funds), the funds of

which can be used to stimulate pollution prevention and maximum utilization of current MPW” [61].

At seemingly inattention to the institutions for supporting waste processing, nevertheless, a number of projects are supported by the government (processing of tungsten production waste into tungsten concentrate with giving preferential loan of 340 million rubles, solving the problem of waste processing within the cluster “Integrated processing of coal and industrial waste” on the basis of the Kuzbass Technopark, etc.

A promising tool for enhancing processing of solid waste is development of public-private partnership (PPP) in this area. For expanding PPP application, introducing legislative regulation of the procedure of interaction between the government and business (PPP agreement preparation, conclusion, execution, termination, etc.), as well as harmonization of various legislative acts, related to tax, land, environmental legislation, etc. A positive experience of interaction between the government and business in solving the problem of waste processing was noted in 1996 in the Sverdlovsk region. That year, the regional government formed and approved its own program of the constituent entity of the Russian Federation “Processing of MPW in the Sverdlovsk region” (in line with the Federal Program “Processing of MPW in the Sverdlovsk region”). Notice that the Federal Program was limited and consisted of 22 projects, whereas the regional one was open and permanently replenished with projects, the number of which reached 125 by the beginning of 2000 [62]. The program was implemented in two stages. The first stage (1997–1998) provided for implementation of 22 projects based on already developed technologies; at the second stage (1999–2005), the program involved development of new technologies and predominant processing of historical waste. The regional program implementation also implied the adjustment of the organizational mechanism for regulating MPW processing. To coordinate activities on the program implementation, a separate authorized body, Ural Institute of Metals LLC, was established.

In framework of the program, both new production facilities for processing of iron ore processing wastes were organized and existing ones were expanded at Vysokogorsky GOK, as well as slag-processing facilities at joint-stock companies Nizhny Tagil Metallurgical Complex, Klyuchevskoy Ferroalloy Plant, Seversky Pipe Plant, etc. were established or expanded (if existed). Finally, 20.1 million tons of waste from the mining and metallurgical sector were processed. On the whole, 35 kt of copper and copper concentrate, 2 kt of zinc, about 1 million tons of iron metal and magnetic product, 7 kt of ferrochrome, 7.5 million



tons of building materials and 81.0 kt of asbestos were obtained [63]. For example, in 2010 alone, 13.6 million tons of MPW were processed, including 5289.3 kt of smelting waste, 6353.6 kt of mining and processing waste, and 48.5 kt of other waste related to the raw material sector. Unfortunately, in 2020, the program was terminated due to changes in federal budgetary and tax legislation resulting in termination of the government financial support. Nevertheless, the program implementation results proved to be very positive: new technologies were developed and introduced, the volume of waste recycling was almost doubled, and a number of enterprises received government support.

Conclusion

Long-term operation of mining enterprises in Russia resulted in accumulation of at least 80–100 billion tons of waste, which occupy considerable areas in the Central, Ural, West Siberian and other economic regions. Waste from mining and related processing industries is considered as a real reserve for expanding the country's mineral resource base [61, 64]. On the other hand, mining and processing wastes form a serious environmental problem for Russia due to the negative impact on both the environment and humans. The issues of waste processing and use of non-waste and low-waste technologies became urgent since the 60s of the XX century. In the 1990s, this issue was considered within the framework of the environmentally friendly production (EFP) concept, and later, within the framework of the concept of closed supply chains (circular economy). At present, when the environmental aspect has been supplemented by the economic one, the problem of waste has become a priority, as evidenced by the targets of a number of legislative documents and broad support for the concept of closed supply chains.

The transition from a linear economy model to a circular one requires overcoming a number of barriers in the context of ore deposits. First, a legal status of TDs and the legal regime of their use should be determined in the Federal Law “On Subsoil” that will prevent their legal equalization

with natural deposits (taking into account their specific mode of occurrence, differing properties and, correspondingly, differing processing techniques) and simplify the procedure for their involvement in economic circulation. At the same time, TDs should not be regulated by the Federal Law “On Production and Consumption Wastes”. The second point concerns information about TDs, which is currently either absent or very fragmentary.

Potential investors should have information for making decision concerning using TDs. The information completeness requires disclosing data on TD environmental hazard, possible processing techniques, and economic feasibility of TD development. The third problem to be solved is licensing and appraisal of TDs. We believe that when recognizing TD legal status, at the same time, changes should be incorporated into the procedure for their licensing, performance of appraisal work, including their reserves into the state balance sheet, given that, according to scientists, at the initial stages of development, they can be considered as non-traditional types of raw materials. When carrying out environmental and economic appraisal of TDs, a particular attention should be paid to the environmental aspect. Differentiated approaches are required with respect to current and historical waste, coarse-grained and sludge accumulations, mixed and differentiated waste storing.

The transition to circular economy model turns out to be impossible without government support. It is required to legislatively consolidate the mechanism of economic measures stimulating MPW processing, with timely development of the necessary regulatory documents. The PPP mechanism, which has proven its effectiveness in the conditions of the Sverdlovsk region, as well as regional target programs for MPW processing, should become promising tools for MPW processing.

Solving the identified problems will enable accelerating the transition to circular economy with regard to MPW management that will allow slowing down depletion of non-renewable natural resources, expanding waste processing, and reducing technogenic pressure on the environment.

References

1. Podvishensky S. N., Chalov V. I., Kravchenko O. P. *Rational use of natural resources in mining sector*. Moscow: Nedra Publ.; 1988. (In Russ.).
2. Rossman G. I., Pikalova V. S. The problem of ecological-economic evaluation of health damage in the preparation of feasibility study of conditions and development projects of mineral deposits. *Razvedka i ohrana nedr.* 2016;(11):52–58. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24846526>
3. Vormittag E., Saldiva P., Anastacio A., Barbosa F. Jr. High levels of metals/metalloids in blood and urine of residents living in the area affected by the dam failing in barra longa, district, brazil: A preliminary human



biomonitoring study. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2021;83:103566. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103566>

4. Konte M., Vincent R. Mining and quality of public services: The role of local governance and decentralization. *World Development*. 2020;140:105350. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105350>

5. Bykhovsky L. Z., Sporykhina L. V. Industrial waste as a reserve to replenish mineral resources: status and development problems. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2011;(4):15–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16716669>

6. Pakhomova N. V., Richter K. K., Vetrova M. A. Transition to circular economy and closed-loop supply chains as driver of sustainable development. *St Petersburg University Journal of Economic Studies*. 2017;33(2):264–268. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu05.2017.203>

7. Goyal S., Chauhan S., Mishra P. Circular economy research: A bibliometric analysis (2000–2019) and future research insights. *Journal of Cleaner Production*. 2021;287:125011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125011>

8. Ignatyeva M., Yurak V., Pustokhina N. Recultivation of post-mining disturbed land: Review of content and comparative law and feasibility study. *Resources*. 2020;9(6):73. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9060073>

9. Smol M., Marcinek P., Duda J., Szołdrowska D. Importance of sustainable mineral resource management in implementing the circular economy (CE) model and the European green deal strategy. *Resources*. 2020;9(5):55. <https://doi.org/10.3390/RESOURCES9050055>

10. Sarja M., Onkila T., Mäkelä M. A systematic literature review of the transition to the circular economy in business organizations: Obstacles, catalysts and ambivalences. *Journal of Cleaner Production*. 2021;286:125492. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125492>

11. European Commission. *A European Green Deal*. 2020. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

12. Calisto Friant M., Vermeulen W. J. V., Salomone R. Analysing European Union circular economy policies: Words versus actions. *Sustainable Production and Consumption*; 2021;27:337–353. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.11.001>

13. Fitch-Roy O., Benson D., Monciardini D. All around the world: Assessing optimality in comparative circular economy policy packages. *Journal of Cleaner Production*. 2021;286:125493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125493>

14. Trubetskoy K. N., Galchenko Yu. P. Mineral resource sector and natural biota of the earth. *Geoekologiya*. 2012;(6):483–489. (In Russ.).

15. Grant T. V. Prospects for the creation of waste-free productions in nickel industry. *Tsvetnye metally*. 1978;(12):7–15. (In Russ.).

16. Zaitsev V. A., Tsygankov A. P. The main trend of solving the problem of environmental protection is the creation of waste-free industrial production. *Zhurnal Vsesoyuznogo Khimicheskogo Obshchestva im. D.I. Mendeleeva*. 1979;(1):3–12. (In Russ.).

17. Laskorin B. N., Gromov B. V., Tsygankov A. P., Semin V. N. *The main problems of waste-free production development*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1981. (In Russ.).

18. Laskorin B. N., Barsky L. A., Persits V. Z. *Waste-free techniques for processing of mineral raw materials. Systematic analysis*. Moscow: Nedra Publ.; 1984. (In Russ.).

19. Laskorin B. N., Chalov V. I. *Problems of waste-free production in metallurgical industry*. Moscow: TSNIIEtSM Publ.; 1987. (In Russ.).

20. Vyvarets A. D. *Efficiency of waste use under the conditions of production intensification*. Sverdlovsk: USU Publ.; 1987. (In Russ.).

21. Umanets V. N., Kogut A. V. Evaluation of the quality and geometrization of mining and processing waste. *Razvedka i Ochrana Nedr*. 1987;(7):38–42. (In Russ.).

22. Trubetskoy K. N., Umanets V. N., Nikitin M. B. Classification of technogenic deposits: main categories and concepts. *Gornyi Zhurnal*. 1989;(12):6–9. (In Russ.).

23. Arskiy Yu. M., Chainikov V. V. The position of an economic cadastre in the mineral resources information system and its structure. Sun. articles: “*Industrial-and-economic cadastres of natural and technogenic deposits: theory and practice of development*.” Apatity, Academy of Sciences of the USSR; 1990, pp. 26–31. (In Russ.).



24. Ignatyeva M. N., Pakhalchak G. Yu. The economic mechanism of resource-saving in the development of mineral resources potential. *Ural'skoe gornoe obozrenie*. 1996;(6):162–166 (In Russ.).
25. Belik I. S. A system of incentives for production waste use. Collection of essays: *Economic problems of nature management*. Sverdlovsk: UPI; 1991, pp. 11–12. (In Russ.).
26. Yandyganov Ya. Ya. *Environmental entrepreneurship in a region (problems, prospects, effectiveness)*. Yekaterinburg: UrEU Publ.; 1998. (In Russ.).
27. Trubetskoy K. N., Shapar A. G. *Low-waste and resource-saving techniques in open-pit mining*. Moscow: Nedra Publ.; 1993. (In Russ.).
28. Chainikov V. V. Systematic assessment of technogenic deposits. Overview. *Geology, methods of prospecting, exploration and estimation of mineral deposits*. CJSC Geoinformmark Publ. 1999;6–7. (In Russ.).
29. Konyaev V. P., Kryuchkova L. A., Tumanova E. S. *Technogenic mineral raw materials of Russia and its uses*. Moscow: JSC Rosnedra Publ.; 1994. (In Russ.).
30. Tumanova E. S., Tsibizov A. N. et al. *Technogenic resources of mineral construction raw materials*. Moscow: Nedra Publ.; 1991. (In Russ.).
31. Mormil S. I., Salnikov V. L., Amosov L. A. et al. *Technogenic deposits of the Urals and assessment of their environmental impact*. Yekaterinburg; 2002. (In Russ.).
32. Podturkin Yu., Kotkin V., Muslimov R., Saliyeva R. The problems of legal support of the anthropogenic deposits exploration. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2009;(6):29–33.
33. Agafonov V. B. Legal problems of managing waste from mining and associated processing plants. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2015;(2):60–64. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23213698>
34. Popov S. M. Methodological and procedural framework for the formation of directions for the use of production and consumption waste. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2007;(5):81–86. (In Russ.). URL: https://giab-online.ru/files/Data/2007/6/11_Popov.pdf
35. Seleznyov S. G. On the problem of mining waste management. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):40–44. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20164735>
36. Benevolsky B. I., Krivtsov A. I., Romanchuk A. I., Mikhailov B. K. Two aspects of the mining waste disposal problem. *Mineral Recourses of Russia*. 2011;(1):37–42. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15591167>
37. Umanets V. N. Experience in geological and processing assessment of man-made gold formations at some deposits in Kazakhstan. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):87–93. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20164742>
38. Kiperman Y. A., Komarov M. A. Mining waste in the formation of resource saving environmental policy. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2016;(1–2):68–73. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26136406>
39. Mhatre P., Panchal R., Singh A., Bibyan S. A systematic literature review on the circular economy initiatives in the European union. *Sustainable Production and Consumption*. 2021;26:187–202. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.008>
40. Ortega Alvarado I. A., Sutcliffe T. E., Berker T., Pettersen I. N. Emerging circular economies: Discourse coalitions in a norwegian case. *Sustainable Production and Consumption*. 2021;26:360–372. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.011>
41. Harris S., Martin M., Diener D. Circularity for circularity's sake? scoping review of assessment methods for environmental performance in the circular economy. *Sustainable Production and Consumption*. 2021;26:172–186. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.09.018>
42. Kharitonova G. N. Objective and preliminary prerequisites for the transition to “circular economy” in Arctic territories. *Strategies and tools for environmentally sustainable economic development: Proceedings of the XVth ROEE International Research-to-Practice Conference*. Stavropol-Kislovodsk; 2019, pp. 483–487. (In Russ.).
43. Tatarkin A. I., Polyanskaya I. G., Ignatyeva M. N., Yurak V. V. Consistent assessment of the status and prospects of institutional and innovational subsurface resources management in the arctic zone. *Economy of Region*. 2014;(3):146–158. <https://doi.org/10.17059/2014-3-14>
44. Su B., Heshmati A., Geng Y., Yu X. A review of the circular economy in China: Moving from rhetoric to implementation. *Journal of Cleaner Production*. 2013;42:215–227. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.11.020>



45. Bovea M. D., Pérez-Belis V. Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment. *Journal of Environmental Management*. 2018;228:483–494. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.014>
46. Givoni M., Macmillen J., Banister D., Feitelson E. From policy measures to policy packages. *Transport Reviews*. 2013;33:1–20. <https://doi.org/10.1080/01441647.2012.744779>
47. Bouma J. A., Verbraak M., Dietz F., Brouwer R. Policy Mix: Mess or Merit? *Journal of Environmental Economics and Policy*. 2019;8;32–47. <https://doi.org/10.1080/21606544.2018.1494636>
48. Vanhamäki S., Virtanen M., Luste S., Manskinen K. Transition towards a circular economy at a regional level: A case study on closing biological loops. *Resources, Conservation and Recycling*. 2020;156:104716. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104716>
49. Vanhamäki S., Rinkinen S., Manskinen K. Adapting a Circular economy in regional strategies of the European Union. *Sustainability*. 2021;13(3):1518. <https://doi.org/10.3390/su13031518>
50. Winans K., Kendall A., Deng H. The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;68(1):825–833. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>
51. Nunes B. T., Pollard S. J., Burgess P. J., Ellis G., De los Rios I. C., Charnley F. University contributions to the circular economy: Professing the hidden curriculum. *Sustainability*. 2018;10(8):2719. <https://doi.org/10.3390/su10082719>
52. Orlova O. N., Bobina N. A. On the establishment and maintenance of the Sverdlovsk regional production and consumption waste cadaster. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):45–47. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20164736>
53. Solovyanov A. A. Historical (accumulated) environmental damage: Problems and solutions. 7. Implementation of the order of the Government of the Russian Federation of 04.12.2014 No. 2462-r. *Ekologicheskij vestnik Rossii*. 2015;(9):42–48. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24187966>
54. Larichkin F. D., Kamenev E. A., Motlokhov V. V. Non-traditional types of mineral raw materials: relevance, definition and classification. *Gornyi Zhurnal*. 2003;(1):16–20. (In Russ.).
55. Ignatyeva M. N. The main provisions of the geo-eco-socio-economic approach to the development of natural resources. *News of the Ural State Mining University*. 2014;(3):74–80. (In Russ.).
56. Perelet R. A. Ecosystem approach to environmental management and protection. *Ekonomika prirodopol'zovania*. 2006;(3):3–19. (In Russ.).
57. Yurak V., Emelyanova E., Kostromina T. Ecosystems' economic assessment in the context of different climatic zones. In: *E3S Web of Conferences*. XVIII Scientific Forum “Ural Mining Decade” (UMD 2020). 2020;177:04013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017704013>
58. Loginov V. G., Ignatyeva M. N., Balashenko V. V. Harm to the resources of Traditional nature management and its economic evaluation. *Economy of Region*. 2017;13(2):396–409. <https://doi.org/10.17059/2017-2-6>
59. All-Russian conference “Problems of rational use of mining waste”. April 25–26, 2013. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2013;(4):95–98. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20164743>
60. Hassett K. A., Metcalf G. E. Energy tax credits and residential conservation investment: Evidence from panel data. *Journal of Public Economics*. 1995;57(2):201–217. [https://doi.org/10.1016/0047-2727\(94\)01452-T](https://doi.org/10.1016/0047-2727(94)01452-T)
61. Kubarev M. S., Ignatyeva M. N. Economic incentives for processing of technogenic mineral accumulations. *Samarskaa Luka: problemy regional'noj i global'noj ekologii*. 2018;27(3):143–147. URL: http://www.ssc.smr.ru/media/journals/samluka/2018/27_3_17.pdf
62. Danilov N. I. The program for processing of technogenic accumulations in the Sverdlovsk region. Primary areas and implementation results *Proceedings of Higher Educational Institutions. Gornyi Zhurnal. Ural'skoe Gornoe Obozrenie*. 1997;11–12:4–7. (In Russ.).
63. Danilov N. I., Smirnov L. A., Leshchikov V. I. Experience of utilization of technogenic accumulations in the Sverdlovsk region. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2000;(5–6):41–51. (In Russ.).
64. Polyskaya I. G., Yarak V. V., Strovsky V. E. Considering mining wastes as a factor of increasing the balance level of subsoil management in regions. *Economy of Region*. 2019;15(4):1226–1240. <https://doi.org/10.17059/2019-4-20>



Information about the authors

Margarita N. Ignatyeva – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Chief Researcher, Research Laboratory of Disturbed Lands' and Technogenic Objects' Reclamation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus ID [57221952331](#), e-mail: rinis@mail.ru

Vera V. Yurak – Cand. Sci. (Econ.), Head of the Research Laboratory of Disturbed Lands' and Technogenic Objects' Reclamation, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID [0000-0003-1529-3865](#), Scopus ID [57190411535](#), e-mail: vera_yurak@mail.ru

Aleksey V. Dushin – Dr. Sci. (Econ.), Associate Professor, Rector, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation, ORCID [0000-0002-5954-8033](#), Scopus ID [8945062900](#), e-mail: rector@m.ursmu.ru

Vladimir E. Strovsky – Dr. Sci. (Econ.), Professor, Professor at the Department of Economics and Management, Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russian Federation, Scopus ID [57214320640](#), e-mail: ief.etp@ursmu.ru

Received 05.04.2021

Revised 22.04.2021

Accepted 15.06.2021



ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ СЕКТОРЕ ЭКОНОМИКИ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-90-104>**Методы и модели создания рыночного 4PL-оператора
на базе логистического подразделения крупного промышленного холдинга****К. Ж. Кудайберген***Акционерное общество «Национальная горнорудная компания «Тау-Кен Самрук»,
г. Нур-Султан, Республика Казахстан*✉ priemnaya@tks.kz**Аннотация**

Актуальность исследования обусловлена наличием низкой эффективности логистических систем промышленных предприятий и ограниченным набором методов управления операционной логистической деятельностью. Работа затрагивает главные аспекты деятельности логистических подразделений в компании, а именно управленческую, мотивационную, операционную, процессную и информационную функции. Представленные в исследовании модели и инструменты позволяют реализовать масштабную концепцию изменений, меняющую методы работы, экономику и статус логистики крупного промышленного холдинга. В основу разработанной концепции положены методы поиска баланса между логистическими затратами, сервисом и рисками зависимости от сторонних логистических операторов, а также набор инструментов по снижению доли логистических затрат в себестоимости готовой продукции промышленных холдингов. В качестве базовых инструментов преобразований в работе используется портфель проектов, направленных на внедрение матричной организационно-управленческой структуры логистической компании, регламентацию основной деятельности, нормирование и планирование операционной деятельности, внедрение системы KPI и мотивации персонала. Рассмотрены вопросы автоматизации основных процессов логистической компании и создания 4PL-оператора на базе существующей логистической компании крупного промышленного холдинга, позволяющие достичь существенного экономического эффекта и сократить долю логистических затрат в себестоимости готовой продукции.

Ключевые слова

промышленное производство; горнорудная промышленность; промышленные предприятия; логистика; управление; 4PL-оператор; затраты; система KPI

Для цитирования

Кудайберген К. Ж. Методы и модели создания рыночного 4PL-оператора на базе логистического подразделения крупного промышленного холдинга. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):90–104. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-90-104>

EXPERIENCE OF MINING PROJECT IMPLEMENTATION

Research article

**Methods and models for creating a market 4PL operator
based on a logistics division of a large industrial holding company****K. Zh. Kudaibergen***Joint Stock Company “Tau-Ken Samruk” National Mining Company, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan*✉ priemnaya@tks.kz**Abstract**

The study relevance is due to the low efficiency of logistics systems of industrial enterprises and a limited set of methods for managing operational logistics activities. The work touches upon the key aspects of the activities of company logistics departments, namely the management, motivational, operational, process and information functions. The models and tools presented in the study allow implementing a large-scale concept of changes that modifies the work methods, economics and status of logistics of a large industrial holding company. The developed concept is based on methods of finding a balance between logistics costs, services and risks of dependence on third-party logistics operators, as well as on a set of tools to reduce the share of logistics costs in the cost of finished products of industrial holding companies. A portfolio of projects aimed at introducing a matrix organizational and managerial structure of a logistics company, regulating core



activities, normalization and planning of operating activities, introducing a KPI system and staff motivation is used in the study as the basic transformation tools. The issues of automation of a logistics company main processes and creation of a 4PL-operator on the basis of an existing logistics company of a large industrial holding company allowing achieving a significant economic effect and reducing the share of logistics costs in the cost of finished products are considered.

Keywords

industry; mining industry; industrial enterprises; management; logistics; 4PL operator; costs; KPI system

For citation

Kudaibergen K. Zh. Methods and models for creating a market 4PL operator based on a logistics division of a large industrial holding company. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):90–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-90-104>

Введение

Предлагаемое исследование является инновационным и раскрывает комплексную трансформацию логистической службы крупного промышленного холдинга в профессионального 4PL-провайдера услуг. Именно 4PL-провайдер является целевой моделью любого транспортно-складского подразделения, так как оно становится не только центром расходов, но и центром доходов, позволяя генерировать дополнительную прибыль и повышать капитализацию крупного промышленного холдинга [1, 2]. Гармонизация логистических цепочек на функциональном уровне с учетом организационной структурой компании позволяет существенно повысить его конкурентоспособность [3, 4].

В литературе можно найти множество исследований, доказывающих важность логистических процессов, рассматривающих подходы к оптимизации затрат, повышению производительности ресурсов. Однако вопросы целостного подхода, на основании которого руководители промышленного холдинга вместе с руководителями логистики могут разработать комплексную программу действий по оптимизации логистического подразделения остаются недостаточно изученными [5, 6]. При этом даже использование специализированных моделей и инструментов описания логистических процессов не приводит порой к главному преимуществу конкурентоспособности на рынке [7, 8].

В этой связи данное исследование нацелено на достижение баланса интересов собственников промышленных холдингов, которые стараются совмещать экономические выгоды с ростом капитализации компании и ее устойчивости на рынке [8, 9]. При этом определенное внимание уделяется таким важным направлениям, как оптимизация логистических процессов и их функциональности [10, 11]. В качестве базовых принципов и организационных характеристик в работе использовались известные принципы, предложенные в более ранних исследованиях [11–13].

Ввиду особого значения необходимости трансформации логистической инфраструктуры компании в исследовании предложены новые проектные подходы к ее реализации [14, 15]. В работе сделана попытка показать альтернативные варианты трансформации логистической системы промышленных предприятий, базирующихся не только на передаче логистических функций в аутсорсинг сторонним компаниям,

способным обеспечить более экономичный тариф [15, 16]. При этом широко известны случаи, когда подобные шаги давали эффект лишь в краткосрочной перспективе, а в дальнейшем сторонний логистический оператор или прекращал свое существование, или начинал пользоваться своим монопольным положением, или переживал какие-либо внутренние сложности, влияющие на сервис и стоимость предоставляемых услуг [17, 18].

1. Обзор инструментов совершенствования логистической компании крупного промышленного холдинга

Основная часть исследования включает в себя детализированное описание применяемых инструментов (проектов) совершенствования логистической компании промышленного холдинга. По сути набор предлагаемых проектов является стратегией трансформации логистической компании в частности и всей логистической системы холдинга в целом. Исторически сложилось так, что собственная логистика промышленных предприятий обходится владельцам дороже, чем услуги сторонних компаний. Одна из причин – простой ресурсов ввиду неравномерности транспортной работы и отсутствие сторонней загрузки свободных ресурсов. Вторая причина – низкая эффективность самих логистических процессов [20–25].

Представленные в работе проекты можно разделить на два крупных блока.

Первый блок включает в себя пять основных проектов и направлен на повышение внутренней эффективности логистической компании. Этот подход к оптимизации был заимствован из проектов Э. Голдратта, который перед глобальным расширением бизнеса сначала повышал эффективность в рамках имеющихся объемов. Этот же принцип отстаивает и другой гуру бизнес-консультирования И. Адизес. Прежде чем сделать большой шаг вперед, нужно получить крепкую опору [26–28].

Проект №1 является фундаментальным и направлен на построение эффективной организационно-управленческой структуры. Причем разрабатываемая и внедряемая структура должна быть матричной, т.е. иметь возможность бесперебойно обеспечивать имеющихся заказчиков и параллельно быть способной реализовывать проекты развития.



Основные результаты первого проекта заключаются в распределении функционала сотрудников, понимании ими зон ответственности и умении организовать управление проектом.

Проект №2 направлен на четкое распределение ответственности и регламентирование процессов. Регламенты необходимо прописывать на операционном уровне с указанием всех документов и информации, сопровождающих действия сотрудников, и сроков, в которых эти действия должны выполняться. При этом регламенты должны описывать как внутренние процедуры работы отделов, так и процессы взаимодействия с сопряженными отделами. На основании регламентной базы отделом персонала должны быть подготовлены должностные инструкции. Для поддержания регламентной базы в актуальном состоянии в крупных холдингах и компаниях нередко создаются целые отделы.

Проект №3 позволяет организовать эффективное бюджетирование компании за счет нормирования как трудозатрат и численности, так и потребности в материалах, исходя из планируемых объемов работ. Впоследствии план-фактный анализ на основании нормативной базы ляжет в основу системы мотивации персонала. Другим не менее важным эффектом данного проекта является возможность финансового планирования исходя из реальной, а не бюджетной потребности в материалах. Иначе, в случае повышения логистической работы, руководители подразделений требуют сверхлимитные средства, поиск которых происходит в авральном режиме.

Проект №4 является базой для создания мотивационного климата в коллективе. После построения структуры управления, разработки регламентной базы, обучения персонала правилам работы необходима правильная мотивация сотрудников. Мотивация – один из тех факторов, важность которого для построения эффективного бизнеса трудно переоценить. При этом нужно помнить, что мотивировать сотрудников можно не только возможными штрафами или другими административными наказаниями! Важно также помнить, что мотивация не должна быть очень сложной и непрозрачной или субъективной.

Проект №5 направлен на повышение уровня автоматизации технологических процессов в компании.

Второй блок включает в себя проект, направленный на создание 4PL-оператора. Данный проект увязывает внутреннее развитие логистики с выходом на внешние рынки и ориентирует на создание прибыльной логистической компании, которая является самодостаточной с точки зрения финансирования и инвестиций. Именно создание 4PL-оператора является решением существующей проблемы поиска баланса экономической составляющей и рисков зависимости от рыночных логистических операторов.

В результате реализации проекта будут достигнуты и дополнительные эффекты, заключающиеся в сокращении уровня запасов по всей цепочке поставок за счет регулирования партий поставок [29–33].

2. Организация эффективной системы логистики и формирование портфеля проектов развития логистической системы крупных промышленных холдингов

Логистическая система холдинга как самостоятельная отрасль начала зарождаться в 2006 г., когда было решено вывести на аутсорсинг две крупные перевалочные базы, через которые происходило обеспечение основным сырьем добывающих дочерних предприятий, а также транспортных подразделений двух рудников. Созданная транспортная компания (ТК) начала обслуживать добывающие предприятия на основании договорных отношений [34–36].

Главными задачами периода работы ТК с 2006 г. были обеспечение бесперебойности работы добывающих предприятий, централизация логистики, обеспечение обслуживания постоянно увеличивающихся объемов производства.

В рамках этого периода получены следующие эффекты от аутсорсинга:

1. Произведена инвентаризация транспортных активов, а также зданий и сооружений для хранения и перевалки.

2. Централизован и частично оптимизирован штат складских и транспортных сотрудников.

Несмотря на то что транспортные активы находились в изношенном состоянии, удалось из лишней техники создать ремонтный оборотный фонд и получить уверенность в том, что необходимые объемы перевозок на ближайший год будут выполнены без срывов.

Параллельно планируемые объемы перевозок были возложены на имеющийся парк транспортных средств с учетом перспектив его жизнеспособности и составлена программа обновления парка. Во многом это был прорыв, так как руководство компании обратило внимание на требования логистики, и был составлен план ее финансирования.

Однако первый этап эволюции лишь обозначил контуры высокоэффективного логистического оператора, при этом впереди было еще много трудных задач. Самая главная из них – это повышение внутренней эффективности управленческих и эксплуатационных процессов, так как себестоимость логистических услуг в ТК была значительно выше рыночной.

Необходимым начальным условием для предлагаемых преобразований послужили факторы конкурентоспособности компании: наличие производственной базы непосредственно в регионах, где происходит развитие добывающих предприятий; кадровый потенциал на уровне, соответствующем требованиям настоящего времени; качество предоставляемых услуг; имидж предприятия.

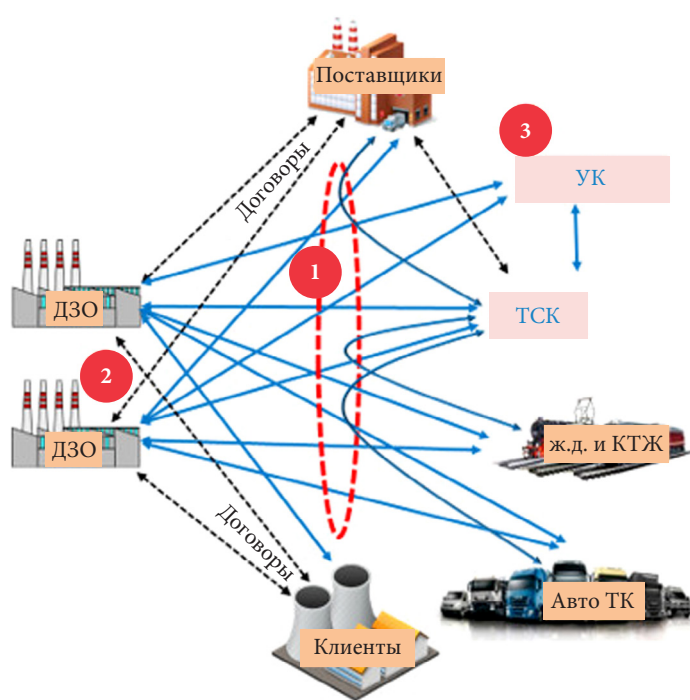
Наряду с этим в компании имеются и слабые стороны, отрицательно влияющие на преобразование, а именно: крайне неудовлетворительное состояние автомобильных дорог; недостаточная мощность складских хозяйств (высокие темпы строительства и ввода в эксплуатацию новых добычных предприятий, а также рост объемов производства существующих добычных предприятий); сложно прогнозируе-

мый рост цен на основные материалы (ГСМ, запасные части) и, как следствие, возможное увеличение себестоимости; слабая подготовка молодых специалистов; низкий по сравнению с добычными предприятиями, находящимися и строящимися в регионе, уровень заработной платы; значительный износ основных средств, прежде всего автомобильного парка, парка дорожно-строительных механизмов и тягового подвижного состава и, как следствие, высокая себестоимость оказываемых услуг.

Результатом проведенных преобразований явился крупный промышленный холдинг, состоящий из следующих структурных и обособленных подразделений

и компаний: управляющая компания, отвечающая за эффективность деятельности холдинга в целом; территориально удаленные друг от друга производственные дочерние зависимые общества (ДЗО); обслуживающие дочерние зависимые общества, в том числе транспортно-складская компания (ТСК) (рис. 1, 2).

Реализация вышеуказанных проектов позволила разработать целевую модель «4PL» оператора, состоящую из управляющей компании, отвечающей за эффективность деятельности холдинга в целом, территориально удаленные друг от друга производственные и обслуживающие дочерние зависимые общества (рис. 3, 4, 5).



- 1.1. Размытость ответственности за логистическую функцию.
- 1.2. Большое количество взаимодействий участников в процессе поставок и невозможность оперативного контроля.
- 1.3. Эффект централизации для управления поставщиками логистических услуг и оптимальность цен не достигаются.
- 2.1. Отсутствие прозрачности учета логистических затрат и возможностей для злоупотреблений.
- 2.2. Выполнение несвойственных логистических функций в ДЗО.
- 2.3. Наличие излишних складских, транспортных и материальных ресурсов.
- 3.1. УК не имеет возможности оценивать эффективность логистической деятельности.
- 3.2. УК получает информацию о сбоях, а не о возможных рисках.
- 3.3. УК несет неоптимальные издержки на логистическую функцию.

Рис. 1. Исходная модель логистического обеспечения крупного промышленного холдинга

Fig. 1. Initial model of logistics support for a large industrial holding company



Рис. 2. Исходная модель транспортного обеспечения крупного промышленного холдинга

Fig. 2. Initial model of transport support for a large industrial holding company

Ключевые установки деятельности 4PL:

- «Одно окно»
- «Точно в срок»
- «От двери до двери»
- «Управление партиями»
- «ИТ-интеграция с участниками цепи поставок»
- «Альянсы с логистическими партнерами»
- «Оптимизация запасов «в пути»
- «Оптимизация внутренних бизнес-процессов»
- «Адаптация к новым требованиям заказчиков»
- «Оптимизация стоимости логистических операций»

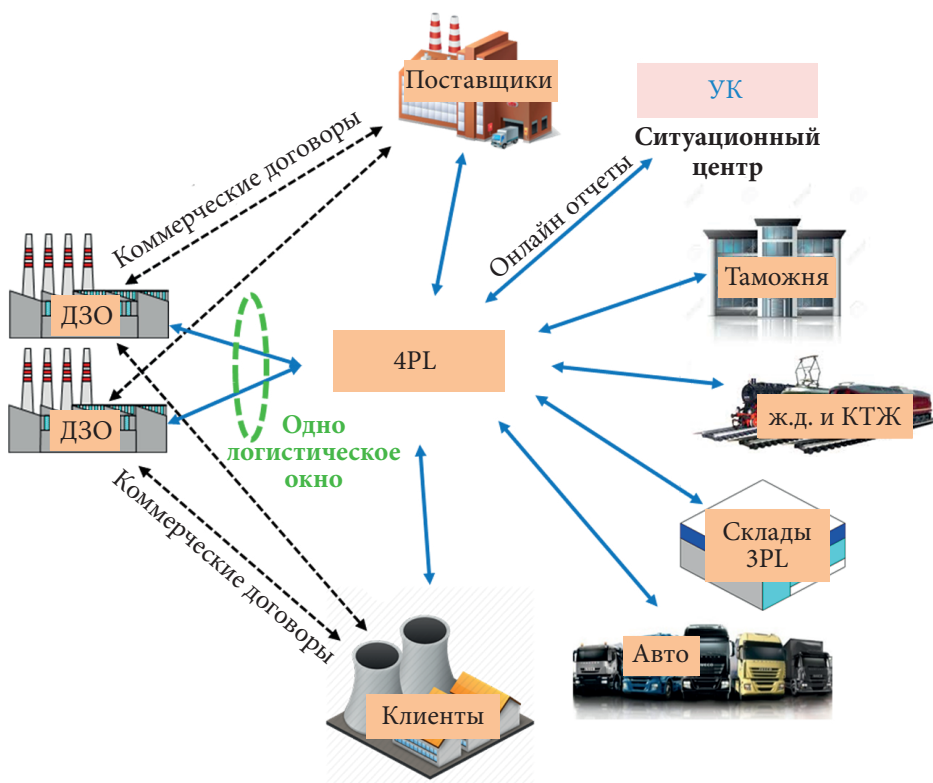


Рис. 3. Целевая модель логистики крупного промышленного холдинга
Fig. 3. Target model of logistics support for a large industrial holding company

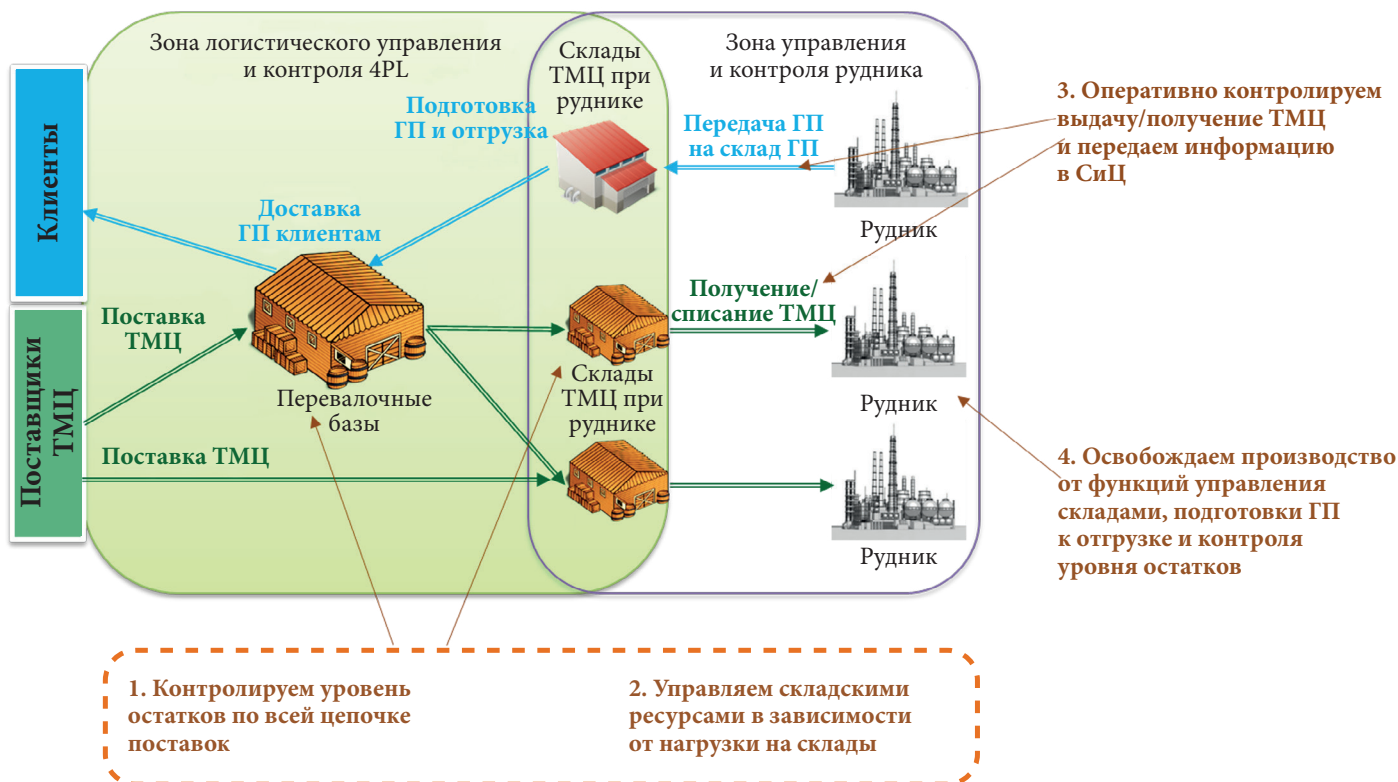


Рис. 4. Целевая модель складского хозяйства крупного промышленного холдинга
Fig. 4. Target model of storage facilities for a large industrial holding company

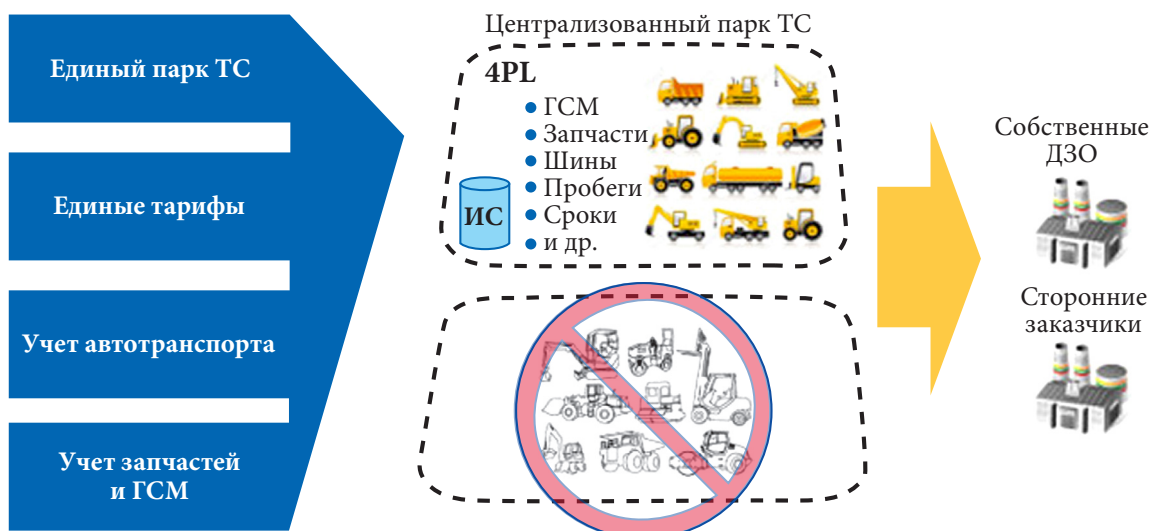


Рис. 5. Целевая модель транспортного обеспечения крупного промышленного холдинга

Fig. 5. Target model of transport support for a large industrial holding company

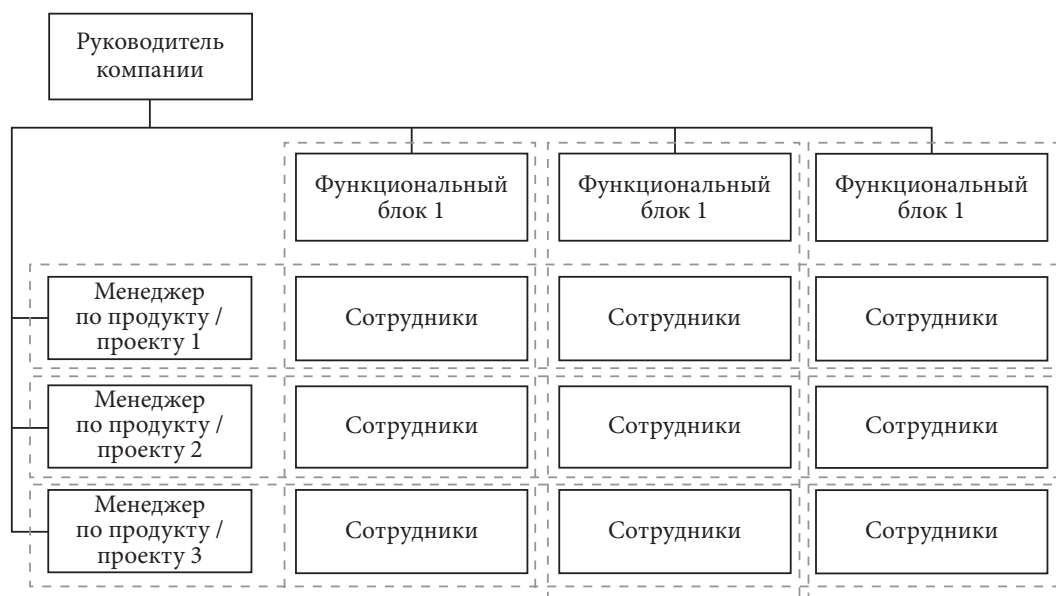


Рис. 6. Пример матричной организационной структуры ТК крупного промышленного холдинга

Fig. 6. An example of a transportation company matrix organizational structure of a large industrial holding company

Дальнейшие преобразования компании в сфере создания рыночного 4PL-оператора на базе логистического подразделения крупного промышленного холдинга состояли из следующих методов и моделей.

3. Формирование матричной организационно-управленческой структуры логистической компании

Целью создания данной структуры является формирование оптимальной матричной организационно-управленческой структуры в логистике с целью повышения эффективности текущей деятельности и возможностей реализации перспективных тенденций развития компании [37, 38].

Есть определенные установки в выстраивании организационной структуры, которые явля-

ются лучшей мировой практикой, но далеко не всегда применяются. Непосредственно руководителю должно подчиняться не более семи человек, при этом 95% коммуникаций директора в компании должны строиться именно на общении с семью (или пятью-шестью) менеджерами, отвечающими за свои направления. Кроме того, руководитель должен мотивировать и контролировать только показатели этих менеджеров/заместителей/начальников департаментов, не опускаясь на следующий уровень управления. В компании должно быть не более четырех уровней управления. То есть во всей компании может быть не более четырех руководящих/инженерных должностей по одной вертикали. Система управления должна быть матричной (рис. 6).



4. Оптимизация и регламентация транспортно-складских бизнес-процессов

Целью оптимизации является сокращение влияния человеческого фактора и минимизация случаев дублирования и отсутствия ответственности [39, 40].

Оптимизацию и регламентацию бизнес-процессов можно выполнять двумя различными методами.

Разработка регламентной базы – «как должно быть» без погружения в специфику текущих процессов на основании теории и лучших практик и изучение процессов компании – «как есть». При этом появляется возможность наложить на существующие процессы новые методы работы и лучшую практику, что позволит получить синтез устоявшихся и новых методов работы.

Анализ текущей ситуации «как есть». На данном этапе необходимо сделать «нарезку» процессов на всех уровнях управления, включая операционный. Для описания процессов можно использовать различные популярные нотации (EPC, IDEF0 и другие), а можно принять собственные правила описания [41, 42].

Главное, чтобы при описании процессов на различных уровнях были обозначены главные участники процессов, а также информационные потоки. После того как процессы будут описаны, появится возможность выявить лишние связи между подразделениями, которые приводят к потере времени и качества выполнения работ [43], и убрать их.

Проведенный анализ позволяет осуществить переход к этапу разработки регламентной базы «как будет» [44–47].

5. Повышение эффективности использования и качества планирования потребности материально-технических ресурсов (МТР)

Целью данного этапа является определение возможности финансового планирования закупок МТР, сокращение перерасхода МТР, сокращение рисков хищений и злоупотреблений [48, 49].

Сложившаяся практика списания материалов, в первую очередь на транспортные средства, была основана на принципах аккумулирования и распределения денежных средств по транспортному подразделению в целом. В такой постановке информация об экономии бюджета уходила к руководству и влекла за собой его сокращение на следующие периоды. Такой подход предопределяет наличие некоторых рисков: перерасход средств, когда компания несет прямые убытки в связи с замораживанием средств в запасах, закупленных сверх потребности; нехватка выделенного лимита и срыв выполнения перевозки. Эти проблемы возникают в ситуации, когда объем грузопотока возрастает или структура грузопотока меняется в сторону удорожания, а лимит выделяется на прежних основаниях.

И первый, и второй риски можно нивелировать, наладив систему планирования потребности в материалах, основываясь на нормировании и планировании складской и транспортной работы [50].

Планирование объемов транспортной работы возможно реализовать по типам используемого транспорта. Для решения данного вопроса необходимо структурировать парк транспорта по видам перевозок и определить, какой вид транспортной работы будет браться за основу для планирования затрат. Очевидно, что для легкового и грузового транспорта – это километры, поскольку именно пробег влияет на количество потраченного ГСМ, износ запчастей, шин, сроки проведения ТО и т.д. Для большинства спецтехники таким показателем может являться мото- или машино-час.

Служба эксплуатации должна научиться планировать транспортную работу в заданных единицах измерения по каждой единице техники, что станет первым и главным шагом для планирования затрат и потребности в МТР.

При этом нормирование расходования материалов должно производиться исходя из объемов транспортной работы. Получив объемы транспортной работы, планово-экономическая служба должна рассчитать, какое количество материалов потребуется для обеспечения нужного количества перевозок. В первую очередь собирается информация об имеющемся парке транспортных средств, а именно: фактический расход ГСМ; сроки эксплуатации; паспортные данные по расходу ГСМ; грузоподъемность; типы выполняемых перевозок/транспортной работы; наличие и исправность спидометрового оборудования; наличие и исправность GPS-оборудования; наличие прочего оборудования, влияющего на расход топлива; прочие характеристики ТС. В дальнейшем необходимо разработать методику нормирования расхода ГСМ, которая должна определять, какие именно данные лягут в основу норматива и для какого вида техники должны применяться поправочные коэффициенты. Поправочные коэффициенты вводятся для различных условий эксплуатации транспорта (зима, лето, городские перевозки, междугородные перевозки, горная дорога, равнинная дорога, загруженность транспорта).

После этого необходимо определить фактические значения нормативов в привязке к каждой единице транспорта следующим образом: проведение фактических замеров расхода топлива; определить данные GPS-оборудования; использование паспортных данных по расходу топлива; использование законодательных постановлений и локальных нормативно-правовых актов [51–53].

После получения данных необходимо провести нормирование исходя из согласованной методики и зафиксировать тариф для каждой единицы транспорта.

Сформированная система нормативов и методика определения плановых затрат предопределяет необходимость автоматизированной обработки информации и внедрения автоматизации процедур планирования.

Для осуществления планирования в информационную систему необходимо занести справочники транспортных средств. Для каждого транспортного средства заносится норматив и перечень поправоч-

ных коэффициентов, а также правила, по которым эти коэффициенты должны применяться. Внесенные сведения позволяют вычислять плановую потребность во всех материалах, необходимых для осуществления перевозки [54, 55].

Таким образом, автоматизация складской, транспортной и управленческой деятельности на базе внедрения TMS, WMS и автоматизации бюджетирования [56–59] является обязательным элементом работы компании. Для транспортно-логистического оператора – это прежде всего работа склада и транспорта. Многие компании стараются автоматизировать логистические процессы на базе имеющейся корпоративной информационной системы (КИС) путем ее доработок. Такая ситуация применима во внутренних логистических подразделениях предприятий, но в отдельной транспортно-складской компании это неприемлемо. В данном случае требуется внедрение профессиональных транспортных и складских систем и их интеграция с КИС, в которой ведутся финансовые, юридические и кадровые вопросы. Для автоматизации складской деятельности на рынке существует большое количество WMS, а для транспортной – TMS [60–62] (рис. 7).

Проведенные исследования позволили разработать и внедрить в компании проект создания 4PL-оператора на базе логистического подразделения крупного промышленного холдинга.

Целями реализации данного проекта являются: интеграция всех участников цепочки поставок в единое информационное поле и управление ими в интересах компании в целом; комплексное управление затратами всей цепочки поставок для достижения максимальной финансовой выгоды; привлечение до-

полнительных объемов грузообработки и повышение оборота компании.

В результате реализации данного проекта транспортно-логистическая компания должна выйти на достаточный на имеющихся объемах перевозок уровень прибыльности, получить средства на обновление и приведение в приемлемое состояние ресурсной базы, оптимизировать стоимость логистических услуг для заказчиков. Достигнув внутренней оптимизации, компания получает уникальную возможность расширить свое влияние на внешних участников цепочки поставок, что позволит оптимизировать стоимость привлекаемых сторонних заказчиков.

Организация 4PL-оператора на базе существующей логистической компании промышленного предприятия – это амбициозный и масштабный проект. Прежде всего необходима полноценная централизация управления транспортом и складом предприятий холдинга, а далее – разработка методов управления цепочкой поставок по принципу «Total Costs». Данный блок работ является ключевым во всем проекте, так как его реализация несет в себе экономический потенциал, которого невозможно достичь в рамках обычного аутсорсинга логистической деятельности. Главный акцент проекта – это выстраивание таких отношений со всеми участниками цепочек поставок, в рамках которых будет возможность гибко реагировать на изменения в сроках, грузопотоках или при возникновении каких-то существенных сбоев на любом этапе поставки.

Важным элементом «Total Costs» является возможность управлять партиями поставок. Логистическая компания, не занимаясь непосредственно закупками сырья и материалов, должна стремиться

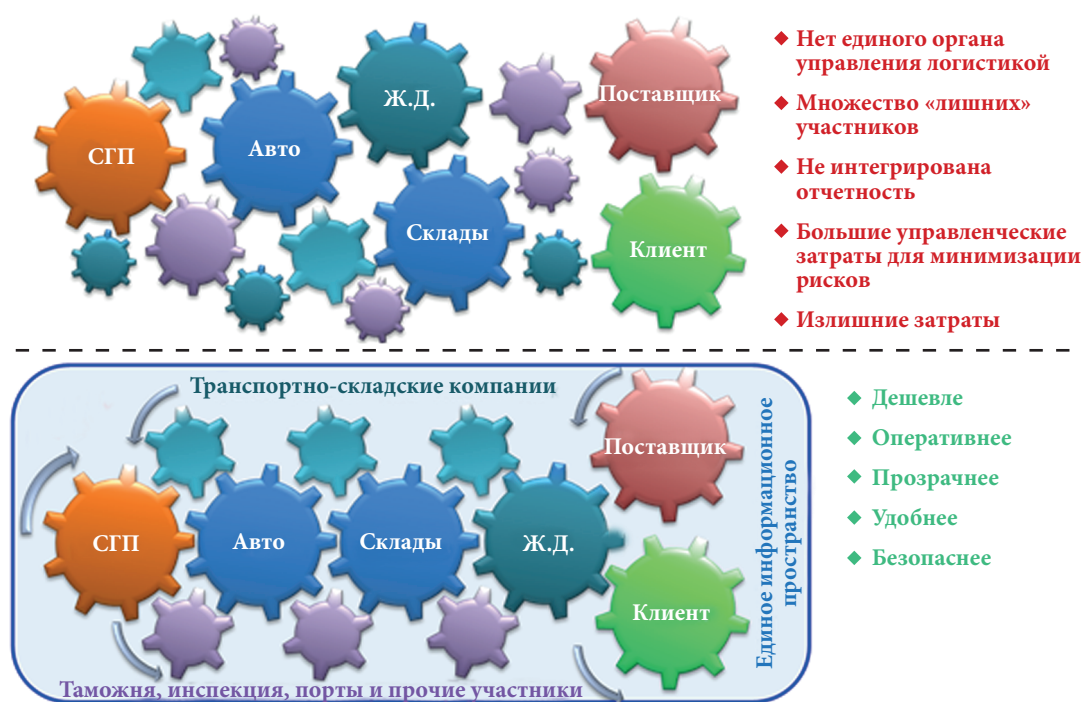


Рис. 7. План внедрения TMS в транспортно-логистической компании

Fig. 7. TMS implementation plan in a transport and logistics company



оказывать влияние на партии поставок, которые отгружает поставщик, пытаясь сократить объем замороженных средств в пути и на складах. Имея представление о том, когда и сколько товара от какого поставщика нужно доставить и сколько нужных материалов находится на складах, а также о потребности для производства, логистический оператор должен иметь полномочия согласовывать с поставщиком партии отгрузок. Как правило, никакая отдельная служба холдинга, кроме финансового департамента, не заинтересована в сокращении замороженных оборотных средств. Наоборот, многие участники заинтересованы в том, чтобы товар отгружался как можно быстрее и как можно больше. Производители таким образом образуют у себя излишние запасы, закупщики получают всевозможные бонусы от поставщиков и так далее. И лишь владелец компании и финансовый директор получают проблему в виде нехватки оборотных средств. При этом финансовая служба не имеет возможности регулировать оплаты поставщикам, так как она не владеет всей ситуацией со сроками поставок, текущими остатками материалов, количеством товара в пути и так далее. И вот именно в этом аспекте логистический оператор становится важнейшим элементом – незаменимым помощником финансовой службы и собственника в высвобождении средств, сокращении кредитных линий и в повышении плановости работы [63, 64].

6. Разработка рекомендаций по реализации инновационных методов совершенствования логистики крупного промышленного предприятия

Рекомендации в сфере формирования организационно-управленческой структуры

По результатам проекта оптимизации организационной структуры можно выделить отдельный эффект, который можно напрямую привязать именно к оргструктурным изменениям, – оптимизация численности персонала. Учитывая все сложности, политические риски, человеческий фактор и прочие нюансы, можно утверждать, что оптимизация структуры управления позволяет достичь экономии на ФОТ административно-управленческого персонала в размере 10–15 %. Наш опыт позволил достигнуть отметки в 15 % административно-управленческих затрат и 4 % от общих затрат компании. При этом внедрение подхода семи прямых подчинений позволяет руководителям более эффективно контролировать и управлять деятельностью компании. Сокращение до четырех уровней управления позволяет более эффективно управлять функциональными областями компании, минимизируя искажения информации при декомпозиции стоящих целей, задач и показателей.

Логистическая компания должна работать в матричной структуре управления. Внедрение матричной структуры управления позволяет реализовать инновационные проекты развития и является важнейшим и необходимым условием для достижения целей исследования.

Рекомендации в области регламентации и оптимизации бизнес-процессов

Практика показывает, что регламентация бизнес-процессов позволяет сократить общие затраты в регламентируемом процессе на 5–10% за счет сокращения трудозатрат, временных потерь и роста производительности труда персонала. Существенно повышается качество управленческих решений и создается фундамент для эффективного мониторинга состояния логистических процессов и внедрения системы управления рисками. Компания с высоким уровнем регламентации становится более устойчивой на рынке. Также очевидно, что полноценное функционирование матричной системы управления невозможно без регламентации основных процессов компании. Регламентация является необходимым условием и для развития компании, и для реализации внутренних проектов.

Рекомендации по организации процессов планирования, нормирования и бюджетирования

Практика показывает, что нормирование и планирование расхода МТР дают эффект в размере 15% от затрат всей логистической компании. Внедренная система планирования и нормирования позволяет выстроить четкую систему план-фактных показателей и систему мотивации персонала, ориентированную на выполнение или экономию плановых затрат. После построения структуры управления и произведенной регламентации деятельности система планирования и нормирования является логическим продолжением оптимизации.

Рекомендации в сфере формирования совокупности показателей эффективности и мотивации персонала

Выстроенная система мотивации без каких-либо прочих мероприятий позволяет достичь экономии или повышения производительности на 10–15%. При этом внедренная система мотивации несет в себе важный фактор «очищения» компании от сотрудников, которые не разделяют ее цели и не готовы отвечать за показатели, коррелирующие с показателями стратегического развития компании. Система KPI и мотивации для многих сотрудников является отличным стимулом проявлять инициативу, генерируя новые прорывные решения для развития компании.

Рекомендации в сфере автоматизации технологических процессов

Экономический эффект от чистой автоматизации может составлять 5–10% от общих затрат предприятия и связан он с сокращением трудозатрат персонала, сокращением документооборота, ошибок и переделок. Внедрение систем автоматизации складской и транспортной деятельности является финализирующим проектом, закрепляющим разработанные решения в рамках других проектов. В результате реализации этого проекта компания стала эффективной изнутри с точки зрения затрат и качества работы, и это позволяет перейти к проектам, нацеленным на внешний рынок и качественно новые показатели повышения дохода.



Заключение и выводы

Проведенное исследование позволяет сделать несколько важных выводов:

1. При оптимизации логистики всегда нужно искать баланс не между двумя составляющими, а между тремя: затраты, сервис, безопасность/независимость от внешних операторов.

2. При должном желании и компетенциях можно реализовать масштабную концепцию преобразования, даже в крупных бюрократических холдингах.

3. Прежде чем выходить на внешний рынок, необходимо стать эффективным внутри собственного подразделения или компании.

4. Прежде чем реализовывать какие-либо масштабные проекты, необходимо выстроить матричную систему управления и высвободить время руководства для участия в проекте в качестве кураторов, а иногда и методологов.

5. В целом, за счет оптимизации логистики (только склада и транспорта), возможно достигнуть экономического эффекта в размере 2–3% от оборота компании. В нашем случае был достигнут эффект порядка 10 млн долл. при обороте компании в 500 млн долл., что составляет 2% от оборота. Если рассчитывать данный показатель от прибыли, то, в зависимости от рентабельности компании, он может достигать любых значений.

6. Реализация масштабных концепций на промышленных предприятиях с должным эффектом возможна в течение длительных сроков – от 1 до 10 лет.

Таким образом, в работе предложены инновационные методы совершенствования логистики крупного предприятия:

1. Создание собственного 4PL-оператора, по сути являющейся новацией на территории РК и лучшей мировой практикой.

2. Создание эффективной матричной структуры управления в рамках ТСК, позволяющей параллельно с текущей деятельностью реализовывать масштабную программу изменений.

3. Внедрение эффективной и доступной системы управления проектами, позволяющей вовлекать в работу персонал, не обладающий специальными навыками управления проектами.

4. Достижение реального экономического эффекта, подтвержденного экономическими службами холдинга.

5. Создание лучшей практики оптимизации внутренней деятельности ДЗО в рамках холдинга, что особенно важно для выполнения государственной программы трансформации крупнейших предприятий.

Список литературы

1. Ботнарчук М. В. Партнерские взаимоотношения – императив ведения логистического бизнеса. *Общество: политика, экономика, право*. 2011;(1):53–57. URL: http://dom-hors.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/pep/8-2011-1/botnaryuk.pdf
2. Зайцев Е. И., Парфенов А. В., Уваров С. А. Процессная модель формирования надежных цепей поставок. *Логистика и управление цепями поставок*. 2012;(49):5–14.
3. Kolinski A., Horzela A., Cudzilo M., Domanski R. Reference Model of Information Flow in Business Relations with 4PL Operator. In: Kolinski A., Dujak D., Golinska-Dawson P. (eds.) *Integration of Information Flow for Greening Supply Chain Management. EcoProduction (Environmental Issues in Logistics and Manufacturing)*. Springer, Cham.; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24355-5_2
4. Боцвин Д. В., Мамаев Э. А. Модель функциональной деятельности контейнерной компании. Сборник научных трудов *Sworld*. 2011;1(1):68–71.
5. Капитонов А. Е. *Организация контейнерных перевозок на основе принципов логистики* [дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08]. СПб.; 2001. 190 с.
6. Боцвин Д. В., Ковалев Г. А., Мамаев Э. А. Организация сборных контейнерных перевозок на железнодорожном транспорте. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2012;(2):119–125. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17746486>
7. Боцвин Д. В. Логистические основы организации контейнерных перевозок на базе координационной компании. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2011;(5):58–61.
8. Бауер А. 4PL-провайдеры рассматривают логистику как решающий фактор в конкретной борьбе. *Логинфо*. 2005;(3):26–27.
9. Baidya A., Bera K. U., Maiti M. Models for solid transportation problems in logistics using particle swarm optimisation algorithm and genetic algorithm. *International Journal of Logistics Systems and Management (IJLSM)*. 2017;27(4):487–526. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.085225>
10. Çağlar Kalkan B., Aydin K. The role of 4PL provider as a mediation and supply chain agility. *Modern Supply Chain Research and Applications*. 2020;2(2):99–111. <https://doi.org/10.1108/MSRA-09-2019-0019>
11. Багинова В. В., Кузьмин Д. В. Особенности развития контейнерных перевозок в России. *Современные проблемы транспортного комплекса России*. 2013;3(2):49–52. URL: <https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/2222-9396-2013-4-2-49-52/101>
12. Герами В. Д. Логистическая терминология в программных документах развития транспорта. *Логистика и управление цепями поставок*. 2013;1(54):60–63.
13. Герами В. Д. Логистические центры: международная терминология и 271 классификация. *Логистика сегодня*. 2013;(1):2–7.



14. Герами В. Д., Колик А. В. *Управление транспортными системами. Транспортное обеспечение логистики*. М.: Юрайт; 2016. 438 с.
15. Cezanne C., Saglietto L. Redefining the boundaries of the firm: the role of 4PLs. *The International Journal of Logistics Management*. 2015;26(1):30–41. <https://doi.org/10.1108/IJLM-06-2012-0054>
16. *Connecting to complete: Trade Logistics in the Global Economy, the Logistics Performance Index and Its Indicators 2016*. EU: World Bank; 2016. 72 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24598>
17. Волков В. Д., Герами В. Д. Системно-операционные основы логистики и управления цепями поставок. *Интегрированная логистика*. 2011;(2):6–10.
18. Баскаков П. В., Матюшин Л. Н. Интеграция России в международную транспортную систему (функциональный аспект). *ЭТАП: Экономическая теория, анализ, практика*. 2015;(5):66–88.
19. Folinas D. (ed.) *Outsourcing Management for Supply Chain Operations and Logistics Service*. Hershey, PA: IGI Global; 2013. <http://doi:10.4018/978-1-4666-2008-7>
20. Dyczkowska J. 4PL logistics operator in the supply chain. *Zeszyty Naukowe Akademii Sztuki Wojennej*. 2018;110(1):25–36. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.1461>
21. Papadopoulou E. M., Manthou V., Vlachopoulou M. 4PL network partnerships: the pre-selection phase. *International Journal of Logistics*. 2013;16(3):175–192. <https://doi.org/10.1080/13675567.2013.809708>
22. Гапанович В. А., Розенберг И. Н. Основные направления развития интеллектуального железнодорожного транспорта. *Железнодорожный транспорт*. 2011;(4):5–11. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16386369>
23. Sahin E., Başaran N., Aktan C. Relation of 3PL and 4PL activities and their effect on emerging economies. *International Journal of Management Economics and Business*. 2016;12:262–269. <https://doi.org/10.17130/ijmeb.2016icaf.22440>
24. *Fact-finding studies in support of the development of an EU strategy for freight transport logistics Lot 1: Analysis of the EU logistics sector. Final report*. 2015. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/studies/doc/2015-01-freight-logistics-lot1-logistics-sector.pdf> (Дата обращения: 20.12.2020)
25. Gruchmann T., Melkonyan A., Krumme K. Logistics Business Transformation for Sustainability: Assessing the Role of the Lead Sustainability Service Provider (6PL). *Logistics*. 2018;2(4):25. <https://doi.org/10.3390/logistics2040025>
26. Ггарарский Э. А. Прогрессивные (логистические) транспортнотехнологические системы как фактор снижения страховых рисков. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2011;(9):14–16.
27. Gruchmann T., Pratt N., Eiten J., Melkonyan A. 4PL digital business models in sea freight logistics: the case of FreightHub. *Logistics*. 2020;4(2):10. <https://doi.org/10.3390/logistics4020010>
28. Handfield R. Preparing for the era of the digitally transparent supply chain: a call to research in a new kind of journal. *Logistics*. 2017;1(1):2. <https://doi.org/10.3390/logistics1010002>
29. Степанов Д. Ю. Интеграция модулей логистики и финансов при внедрении корпоративных информационных систем на примере SAP ERP. *Проблемы экономики*. 2014;62(4):22–27.
30. Степанов Д. Ю. Способы интеграции данных корпоративных информационных систем. *Естественные и технические науки*. 201;69(1):207–213.
31. Якунин В. И. Новые формы взаимодействия железнодорожного и морского транспорта в условиях глобализации международных перевозок грузов. *Транспорт: наука, техника, управление*. 2007;(8):4–12.
32. Schramm H.-J., Czaja C. N., Dittrich M., Mentschel M. Current advancements of and future developments for fourth party logistics in a digital future. *Logistics*. 2019;3(1):7. <https://doi.org/10.3390/logistics3010007>
33. Губский М. И. Формирование 3PL- и 4PL-компаний как ключевой элемент государственной политики в сфере логистики. *Проблемы управления (Минск)*. 2009;(1):75–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28400051>
34. Yang H., Zuo Y. H., Li Y. R. IoT-based 4PL: prospects and business models. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;273:65–69. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.273.65>
35. Lee H.-Y., Seo Y.-J., Dinwoodie J. Supply chain integration and logistics performance: the role of supply chain dynamism. *The International Journal of Logistics Management*. 2016;27(3):668–685. <https://doi.org/10.1108/IJLM-06-2015-0100>
36. Кириллова А. Г. *Методология организации контейнерных и контрейлерных перевозок в мультимодальных автомобильно-железнодорожных сообщениях* [дисс. ... д-ра техн. наук: 05.22.01]. 2010. 335 с.
37. Клепиков В. В. Логистические центры как инструмент организации смешанных перевозок. *Морские порты России*. 2003;(3):37–41.
38. Клименко В. Роль 4PL-провайдеров в управлении логистическими центрами. *Логистика*. 2012;(4):38–40. URL: <http://www.logistika-prim.ru/sites/default/files/38-40.pdf>
39. Зубков В. Н., Рязанова Е. В. Методы эффективного взаимодействия участников перевозочного процесса в транспортных узлах. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2012;(1):135–143. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17743441>



40. Hinkka V., Häkkinen M., Holmström J., Främpling K. Supply chain typology for configuring cost-efficient tracking in fashion logistics. *The International Journal of Logistics Management*. 2015;26(1):42–60. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2011-0016>
41. Mehmman J., Teuteberg F., Freye D. Sequencing of bulk transports in a 4PL scenario. In: *The International Conference on Logistics & Sustainable Transport*. Celje, Slovenia. 2013;10.
42. Довнар В. И. О путях развития отечественной логистики. *Экономика и управление (Минск)*. 2013;(3):110–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36577193>
43. Jonsson P. *Logistics and Supply Chain Management*. London: McGraw-Hill Higher Education; 2008. 491 p.
44. Lambrechts W., Son-Turan S., Reis L., Semeijn J. Lean, green and clean? Sustainability reporting in the logistics sector. *Logistics*. 2019;3(1):3. <https://doi.org/10.3390/logistics3010003>
45. Macharis C., Melo S., Woxenius J., van Lier T. (eds.) *Sustainable Logistics Vol: 6*. Emerald Group Publishing; 2014. 365 p. <https://doi.org/10.1108/S2044-994120140000006022>
46. Ералин Ж. М., Гончаренко С. Н. Разработка моделей решения ключевых проблем стратегического развития уранодобывающего предприятия. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019;4:199–208. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-199-208>
47. Vostrikov A. V., Prokofeva E. N., Goncharenko S. N., Gribov I. V. Analytical modeling for the modern mining industry. *Eurasian Mining*. 2019; (2):30–35. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.07>
48. Huang M., Ren L., Lee L.-H., Wang X. 4PL routing optimization under emergency conditions. *Knowledge-Based Systems*. 2015;89:126–133. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.06.023>
49. Ayan O., Ozturk M. G., Kosegolu A. M., Colak M. Supply chain resilience in 4PL companies. In: *4th Global Business Research Congress*. 2018. Istanbul, Turkey. 2018;7:359–361. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.916>
50. Дементьев А. В. *Контрактная логистика*. СПб.: ООО «Книжный Дом»; 2013. 146 с.
51. Randall W. S., Hawkins T. G., Haynie J. J., Nowicki D. R. et. al. Performance-based logistics and interfirm team processes: an empirical investigation. *Journal of Business Logistics*. 2015;36(2):212–230. <https://doi.org/10.1111/jbl.12084>
52. Дыбская В. В., Зайцев Е. И., Сергеев В. И., Стерглигова А. Н. *Логистика*. М.: Эксмо; 2014. 944 с.
53. Schramm H.-J., Czaja C. N., Dittrich M., Mentschel M. Current advancements of and future developments for fourth party logistics in a digital future. *Logistics*. 2019;3(1):7. <https://doi.org/10.3390/logistics3010007>
54. Verhoeven P., Sinn F., Herden T. T. Examples from blockchain implementations in logistics and supply chain management: exploring the mindful use of a new technology. *Logistics*. 2018;2(3):20. <https://doi.org/10.3390/logistics2030020>
55. Vivaldini M. 3PL, 4PL and insourcing logistics. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*. 2015;10:21–38. <https://doi.org/10.15675/gepros.v10i4.1237>
56. Qian X., Fang S.-C., Yin M., et. al. Selecting green third party logistics providers for a loss-averse fourth party logistics provider in a multiattribute reverse auction. *Information Sciences*. 2021;548:357–377. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.09.011>
57. Qian X., Huang M., Yin M., Zhang Q., Yu Y. A Multiattribute Decision Approach for 4PL Supply Base Design. In: *2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2019. P. 4281–4285 <https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832611>
58. Губенко В. С. *Управление цепями поставок контейнерных грузов на принципах логистического аутсорсинга* [автореф. дис. ... канд. экон. наук]. СПб.: ИНЖЭКОН; 2009. 18 с.
59. Qian X., Chan F. T. S., Mingqiang Yin, Qingyu Zhang et. al. A two-stage stochastic winner determination model integrating a hybrid mitigation strategy for transportation service procurement auctions. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;149:106703. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106703>
60. Cui Y., Huang M., Dai Q. 4PL collaborative routing customization problem on the dynamic networks. In: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 2017. P. 1345–1349. <https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256289>
61. Cui Y., Huang M., Zhang X., Yang X. 4PL routing problem on fuzzy time varying networks. In: *First International Conference Economic and Business Management 2016*. 2016. P. 438–444. <https://doi.org/10.2991/feb-16.2016.67>
62. Cui Y., Huang M., Liu J. Multi-objective 4PL routing problem on time varying networks. In: *12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 2016. P. 271–275. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603185>
63. Zemzam A., Maataoui E. M., Hlyal M. et. al. Inventory management of supply chain with robust control theory: literature review. *International Journal of Logistics Systems and Management (IJLSM)*. 2017;27(4):438–465. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.10005787>
64. Линёва О. Н. Оценка эффективности функционирования логистических систем. *Российское предпринимательство*. 2008;(6–1):21–23.



References

1. Botnaryuk M. V. Partnership is an imperative of conduct of a logistics business *Obshchestvo: Politika, Ekonomika, Pravo*. 2011;(1):53–57. (In Russ.). URL: http://dom-hors.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/pep/8-2011-1/botnaryuk.pdf
2. Zaytsev E. I., Parfenov A. V., Uvarov S. A. Process model for the formation of reliable supply chains. *Logistika i Upravlenie Tsepyami Postavok*. 2012;(49):5–14. (In Russ.).
3. Kolinski A., Horzela A., Cudzilo M., Domanski R. Reference Model of Information Flow in Business Relations with 4PL Operator. In: Kolinski A., Dujak D., Golinska-Dawson P. (eds.) *Integration of Information Flow for Greening Supply Chain Management. EcoProduction (Environmental Issues in Logistics and Manufacturing)*. Springer, Cham.; 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24355-5_2
4. Botsvin D. V., Mamaev E. A. A model of the functional activity of a container company. *Sbornik Nauchnykh Trudov Sverdlovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. 2011;1(1):68–71. (In Russ.).
5. Kapitonov A. E. *Organization of container transportation based on the principles of logistics*. [Ph.D. thesis in Engineering Science: 05.22.08]. St.-Petersburg; 2001. 190 p. (In Russ.).
6. Botsvin D. V., Kovalev G. A., Mamaev E. A. Organization of consolidated container transportation by rail. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. 2012;(2):119–125. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17746486>
7. Botsvin D. V. Logistics bases for organization of container transportations on the basis of the coordination company. *Transport: Science, Equipment, Management*. 2011;(5):58–61. (In Russ.).
8. Bauer A. 4PL providers see logistics as a decisive factor in a competitive activity. *Loginfo*. 2005;(3):26–27. (In Russ.).
9. Baidya A., Bera K. U., Maiti M. Models for solid transportation problems in logistics using particle swarm optimisation algorithm and genetic algorithm. *International Journal of Logistics Systems and Management (IJLSM)*. 2017;27(4):487–526. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.085225>
10. Çağlar Kalkan B., Aydin K. The role of 4PL provider as a mediation and supply chain agility. *Modern Supply Chain Research and Applications*. 2020;2(2):99–111. <https://doi.org/10.1108/MSRA-09-2019-0019>
11. Baginova V. V., Kuzmin D. V. Features of piggyback in Russia. *Modern Problems of Russian Transport Complex*. 2013;3(2):49–52. URL: <https://transcience.ru/index.php/MPRTC/article/view/2222-9396-2013-4-2-49-52/101>
12. Gerami V. D. Logistic terminology in programmatic documents of transport development. *Logistics and Supply Chain Management*. 2013;1(54):60–63. (In Russ.).
13. Gerami V. D. Logistics centers: international terminology and Classifications 271. *Logistika segodnya*. 2013;(1):2–7. (In Russ.).
14. Gerami V. D., Kolik A. V. *Transport system management. Logistics transport support*. Moscow: Yurait Publ. House; 2016. 438 c. (In Russ.).
15. Cezanne C., Saglietto L. Redefining the boundaries of the firm: the role of 4PLs. *The International Journal of Logistics Management*. 2015;26(1):30–41. <https://doi.org/10.1108/IJLM-06-2012-0054>
16. *Connecting to complete: Trade Logistics in the Global Economy, the Logistics Performance Index and Its Indicators 2016*. EU: World Bank; 2016. 72 p. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24598>
17. Volkov V. D., Gerami V. D. System-operational bases of logistics and supply chain management. *Integrirovannaya Logistika*. 2011;(2):6–10. (In Russ.).
18. Baskakov P. V., Matyushin L. N. Integration of Russia into the international transport system (functional aspect) *Ekonomicheskaya Teoriya, Analiz, Praktika*. 2015;(5):66–88. (In Russ.).
19. Folinas D. (ed.) *Outsourcing management for supply chain operations and logistics service*. Hershey, PA: IGI Global; 2013. <http://doi:10.4018/978-1-4666-2008-7>
20. Dyczkowska J. 4PL logistics operator in the supply chain. *Zeszyty Naukowe Akademii Sztuki Wojennej*. 2018;110(1):25–36. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.1461>
21. Papadopoulou E. M., Manthou V., Vlachopoulou M. 4PL network partnerships: the pre-selection phase. *International Journal of Logistics*. 2013;16(3):175–192. <https://doi.org/10.1080/13675567.2013.809708>
22. Gapanovich V. A., Rozenberg I. N. Basic trends in development of smart railway transport. *Zheleznodorozhnyy Transport*. 2011;(4):5–11. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16386369>
23. Sahin E., Başaran N., Aktan C. Relation of 3PL and 4PL activities and their effect on emerging economies. *International Journal of Management Economics and Business*. 2016;12:262–269. <https://doi.org/10.17130/ijmeb.2016icaf22440>
24. *Fact-finding studies in support of the development of an EU strategy for freight transport logistics Lot 1: Analysis of the EU logistics sector. Final report*. 2015. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/strategies/studies/doc/2015-01-freight-logistics-lot1-logistics-sector.pdf> (Accessed: 20.12.2020)
25. Gruchmann T., Melkonyan A., Krumme K. Logistics Business Transformation for Sustainability: Assessing the Role of the Lead Sustainability Service Provider (6PL). *Logistics*. 2018;2(4):25. <https://doi.org/10.3390/logistics2040025>



26. Gagar'sky E. A. The progressive (logistics) transport-technological systems as factor of reducing an insurance risk. *Transport: Science, Equipment, Management*. 2011;(9):14–16.
27. Gruchmann T., Pratt N., Eiten J., Melkonyan A. 4PL digital business models in sea freight logistics: the case of FreightHub. *Logistics*. 2020;4(2):10. <https://doi.org/10.3390/logistics4020010>
28. Handfield R. Preparing for the era of the digitally transparent supply chain: a call to research in a new kind of journal. *Logistics*. 2017;1(1):2. <https://doi.org/10.3390/logistics1010002>
29. Stepanov D. Yu. Integration of logistics and finance modules in the implementation of corporate information systems through the example of SAP ERP. *Problemy ekonomiki*. 2014;62(4):22–27. (In Russ.).
30. Stepanov D. Yu. Methods for integration of corporate information system data. *Natural and Technical Sciences*. 201;69(1):207–213. (In Russ.).
31. Yakunin V. I. New forms of interaction of railway and sea transport under conditions of globalization of international freight transportations. *Transport: Science, Equipment, Management*. 2007;(8):4–12.
32. Schramm H.-J., Czaja C. N., Dittrich M., Mentschel M. Current advancements of and future developments for fourth party logistics in a digital future. *Logistics*. 2019;3(1):7. <https://doi.org/10.3390/logistics3010007>
33. Hubski M. 3PL- and 4 PL-companies as a key element of the state policy in the field of logistics. *Problemy upravleniya (Minsk)*. 2009;30(1):75–79. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=28400051>
34. Yang H., Zuo Y. H., Li Y. R. IoT-based 4PL: prospects and business models. *Applied Mechanics and Materials*. 2013;273:65–69. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.273.65>
35. Lee H.-Y., Seo Y.-J., Dinwoodie J. Supply chain integration and logistics performance: the role of supply chain dynamism. *The International Journal of Logistics Management*. 2016;27(3):668–685. <https://doi.org/10.1108/IJLM-06-2015-0100>
36. Kirillova A. G. *Methodology for organizing container and piggyback transportation in multimodal rail and road transportation*. [Doctoral thesis in Engineering Science: 05.22.01]. 2010. 335 c. (In Russ.).
37. Klepikov V. V. Logistics centers as a tool for organizing multimodal transportation. *Morskie porty Rossii*. 2003;(3):37–41. (In Russ.).
38. Klimenko V. 4PL-providers' role in logistic centres control. *Logistika*. 2012;(4):38–40. URL: <http://www.logistika-prim.ru/sites/default/files/38-40.pdf>
39. Zubkov V., Ryazanova E. Methods for efficient interaction of participants of transportation process at transport junctions. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. 2012;(1):135–143. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17743441>
40. Hinkka V., Häkkinen M., Holmström J., Främling K. Supply chain typology for configuring cost-efficient tracking in fashion logistics. *The International Journal of Logistics Management*. 2015;26(1):42–60. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2011-0016>
41. Mehmman J., Teuteberg F., Freye D. Sequencing of bulk transports in a 4PL scenario. In: *The International Conference on Logistics & Sustainable Transport*. Celje, Slovenia. 2013;10.
42. Dovnar V.I. On the paths of domestic logistics development. *Ekonomika i upravlenie (Minsk)*. 2013;(3):110–112. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36577193>
43. Jonsson P. *Logistics and Supply Chain Management*. London: McGraw-Hill Higher Education; 2008. 491 p.
44. Lambrechts W., Son-Turan S., Reis L., Semeijn J. Lean, green and clean? Sustainability reporting in the logistics sector. *Logistics*. 2019;3(1):3. <https://doi.org/10.3390/logistics3010003>
45. Macharis C., Melo S., Woxenius J., van Lier T. (eds.) *Sustainable Logistics Vol: 6*. Emerald Group Publishing; 2014. 365 p. <https://doi.org/10.1108/S2044-994120140000006022>
46. Yeralin Z. M., Goncharenko S. N. Models for solving key problems of strategic development of uranium mines. *Mining informational and analytical bulletin*. 2019;4:199–208. (In Russ.). <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-04-0-199-208>
47. Vostrikov A. V., Prokofeva E. N., Goncharenko S. N., Gribov I. V. Analytical modeling for the modern mining industry. *Eurasian Mining*. 2019; (2):30–35. <https://doi.org/10.17580/em.2019.02.07>
48. Huang M., Ren L., Lee L.-H., Wang X. 4PL routing optimization under emergency conditions. *Knowledge-Based Systems*. 2015;89:126–133. <https://doi.org/10.1016/j.knsys.2015.06.023>
49. Ayan O., Ozturk M. G., Kosegolu A. M., Colak M. Supply chain resilience in 4PL companies. In: *4th Global Business Research Congress*. 2018. Istanbul, Turkey. 2018;7:359–361. <https://doi.org/10.17261/Pressacademia.2018.916>
50. Dement'ev A. V. *Contract Logistics (Monograph)*. St.-Petersburg: Knizhnyy Dom LLC Publ; 2013. 146 p. (In Russ.).
51. Randall W. S., Hawkins T. G., Haynie J. J., Nowicki D. R. et. al. Performance-based logistics and interfirm team processes: an empirical investigation. *Journal of Business Logistics*. 2015;36(2):212–230. <https://doi.org/10.1111/jbl.12084>
52. Dybskaya V. V., Zaytsev E. I., Sergeev V. I., Stergligova A. N. *Logistics*. Moscow: Eksmo Publ.; 2014. 944 p. (In Russ.).



53. Schramm H.-J., Czaja C. N., Dittrich M., Mentschel M. Current advancements of and future developments for fourth party logistics in a digital future. *Logistics*. 2019;3(1):7. <https://doi.org/10.3390/logistics3010007>
54. Verhoeven P., Sinn F., Herden T. T. Examples from blockchain implementations in logistics and supply chain management: exploring the mindful use of a new technology. *Logistics*. 2018;2(3):20. <https://doi.org/10.3390/logistics2030020>
55. Vivaldini M. 3PL, 4PL and insourcing logistics. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*. 2015;10:21–38. <https://doi.org/10.15675/gepros.v10i4.1237>
56. Qian X., Fang S.-C., Yin M., et. al. Selecting green third party logistics providers for a loss-averse fourth party logistics provider in a multiattribute reverse auction. *Information Sciences*. 2021;548:357–377. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.09.011>
57. Qian X., Huang M., Yin M., Zhang Q., Yu Y. A Multiattribute decision approach for 4PL supply base design. In: *2019 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*. 2019, pp. 4281–4285. <https://doi.org/10.1109/CCDC.2019.8832611>
58. Gubenko V. S. *Freight supply chain management based on the principles of logistics outsourcing*. [Abstract of Doctoral Thesis in Economics]. St-Petersburg: INZHEKON Publ.; 2009. 18 p. (In Russ.).
59. Qian X., Chan F. T.S., MingqiangYin, Qingyu Zhang et. al. A two-stage stochastic winner determination model integrating a hybrid mitigation strategy for transportation service procurement auctions. *Computers & Industrial Engineering*. 2020;149:106703. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106703>
60. Cui Y., Huang M., Dai Q. 4PL collaborative routing customization problem on the dynamic networks. In: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. 2017, pp. 1345–1349. <https://doi.org/10.1109/COASE.2017.8256289>
61. Cui Y., Huang M., Zhang X., Yang X. 4PL routing problem on fuzzy time varying networks. In: *First International Conference Economic and Business Management 2016*. 2016, pp. 438–444. <https://doi.org/10.2991/feb-16.2016.67>
62. Cui Y., Huang M., Liu J. Multi-objective 4PL routing problem on time varying networks. In: *12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*. 2016, pp. 271–275. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2016.7603185>
63. Zemzam A., Maataoui E. M., Hlyal M. et. al. Inventory management of supply chain with robust control theory: literature review. *International Journal of Logistics Systems and Management (IJLSM)*. 2017;27(4):438–465. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.10005787>
64. Linyova O. N. Evaluation of logistics system functioning effectiveness. *Rossiyskoe predprinimatelstvo*. 2008;(6–1):21–23. (In Russ.).

Информация об авторе

Канат Жакыпулы Кудайберген – председатель правления, член совета директоров, Акционерное общество «Национальная горнорудная компания «Тау-Кен Самрук», г. Нур-Султан, Республика Казахстан, e-mail: priemnaya@tk.kz

Information about the author

Kanat Zh. Kudaibergen – Chairman of the Board, Member of the Board of Directors, Joint Stock Company “Tau-Ken Samruk” National Mining Company, Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan, e-mail: priemnaya@tk.kz

Поступила в редакцию 07.02.2021

Поступила после рецензирования 25.03.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 07.02.2021

Revised 25.03.2021

Accepted 15.06.2021



ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>**Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан)**А. А. Фейзуллаев¹, А. Г. Годжаев²¹ Институт геологии и геофизики, Национальная академия наук Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан² ПО «Азнефть», Государственная нефтяная компания Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан fakper@gmail.com**Аннотация**

Подземные нефтегазоносные пласты характеризуются пространственной изменчивостью его строения, вещественного состава и петрофизических свойств слагающих его пород: гранулометрического состава, пористости, проницаемости, структуры и текстуры порового пространства, карбонатности, удельного электрического сопротивления, нефте- и водонасыщенности и других свойств. Режимы разработки и эксплуатации подземного газового хранилища, которые были созданы в истощенных подземных нефтегазовых резервуарах, должны учитывать унаследованный характер отработки залежи. Поэтому выявление особенностей изменения продуктивности скважин является актуальной задачей, решение которой может способствовать созданию более эффективной системы эксплуатации подземного газового хранилища. В работе представлены результаты сравнительного анализа изменения в пространстве продуктивности скважин при эксплуатации подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан), созданного в истощенной газоконденсатной залежи. Установлен неравномерный характер в изменении продуктивности скважин, который связывается с неоднородностью резервуара (изменением литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств пород). Исследования основывались на анализе изменений в пространстве ряда параметров резервуара: эффективной мощности продуктивного пласта, литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств горных пород. Анализ изменения эффективной мощности и фильтрационно-емкостных свойств пород VII горизонта пластовой толщи газоконденсатного месторождения Гарадаг выполнен по данным геофизических исследований около 40 скважин и более 90 образцов керна. Данные о продуктивности более 90 скважин легли в основу анализа изменения их в пространстве. Анализ изменений продуктивности в пространстве технологических характеристик скважин (по данным 18 скважин) ПХГ Гарадаг выполнен на примере объема циклической закачки и отбора газа в сезоне 2020–2021 гг. В результате проведенных исследований установлен неравномерный в пространстве характер изменения объемов закачиваемого и отбираемого газа на ПХГ Гарадаг, созданного в соответствующем истощенном газоконденсатном резервуаре. Особенности режима эксплуатации подземного хранилища газа хорошо согласуются с особенностями режима разработки залежи (изменением в пространстве продуктивности скважин). Унаследованный характер разработки залежи и эксплуатации подземного хранилища газа обосновывается неоднородностью резервуара, обусловленной пространственной изменчивостью литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств пород. Учет неоднородности резервуара при проектировании режима эксплуатации подземного хранилища газа является важной предпосылкой повышения эффективности его эксплуатации.

Ключевые слова

месторождение, газоконденсатная залежь, подземное хранилище газа, скважина, геологическая характеристика, неоднородность резервуара

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Фонда Развития Науки при Президенте Азербайджанской Республики – Грант № EIF-BGM-4-RFTF-1/2017.

Для цитирования

Фейзуллаев А. А., Годжаев А. Г. Влияние неоднородности геологического строения резервуара на режим эксплуатации месторождения / подземного хранилища газа Гарадаг (Азербайджан). *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):105–113. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>



GEOLOGY OF MINERAL DEPOSITS

Research article

Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions of Garadagh field / underground gas storage (Azerbaijan)A. A. Feyzullayev¹ , A. G. Gojayev² ¹ Institute of Geology and Geophysics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan² Gas Storage Facility Operation Department of “Azneft” Production Association, State Oil Company of the Azerbaijan Republic (SOCAR), Baku, Republic of Azerbaijan fakper@gmail.com**Abstract**

Underground oil and gas reservoirs (formations) are characterized by spatial variability of their structure, material composition and petrophysical properties of its constituent rocks: particle size distribution, porosity, permeability, structure and texture of the pore space, carbonate content, electrical resistivity, oil and water saturation and other properties. When assessing development and exploitation conditions for underground gas storages, created in depleted underground oil and gas reservoirs, the inherited nature of the reservoir development should be taken into account. Therefore, identifying the features of variations in well productivity is a crucial task, solution of which can contribute to the creation of more efficient system for underground gas storage exploitation. The paper presents the findings of comparative analysis of spatial variations in well productivity during the exploitation of the Garadagh underground gas storage (Azerbaijan), created in the depleted gas condensate reservoir. An uneven nature of the variations in well productivity was established, which was connected with the reservoir heterogeneity (variations in the reservoir lithological composition and poroperm properties). The research was based on the analysis of spatial variations of a number of reservoir parameters: the reservoir net thickness, lithological composition and poroperm properties. The analysis of variations in the net thickness and poroperm properties of the VII horizon of the Garadagh gas condensate field was carried out based on the data of geophysical logging of about 40 wells and studying more than 90 core samples. The data on of more than 90 wells formed the basis for the spacial productivity variation analysis. The analysis of productivity variation in the space of well technological characteristics (based on data from 18 wells) in the Garadagh underground gas storage (UGS) was carried out through the example of the volume of cyclic gas injection and withdrawal in 2020–2021 season. The studies allowed revealing non-uniform spacial variations in the volumes of injected and withdrawn gas at the Garadagh UGS, created in the corresponding depleted gas condensate reservoir. The features of the UGS exploitation conditions are in good agreement with the features of the reservoir development conditions (variations in the well productivity). The inherited nature of the reservoir development and the underground gas storage exploitation is substantiated by the reservoir heterogeneity caused by the spatial variability of the reservoir lithological composition and poroperm properties. Assessing and taking into account the reservoir heterogeneity when designing underground gas storage exploitation conditions should be an important prerequisite for increasing UGS exploitation efficiency.

Keywords

field, gas condensate reservoir, underground gas storage, well, geological characteristics, reservoir heterogeneity

Acknowledgements

The study was prepared with the financial support of the Science Development Foundation (Azerbaijan) under the President of the Republic of Azerbaijan – Grant No. EIF-BGM-4-RFTF-1/2017.

For citation

Feyzullayev A. A., Gojayev A. G. Influence of geological reservoir heterogeneity on exploitation conditions of Garadagh field/underground gas storage (Azerbaijan). *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):105–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-105-113>

Введение

Опыт изучения особенностей геологического строения нефтегазовых месторождений, имеющий важное значение при создании подземных хранилищ газа (ПХГ), показал, что при всем их разнообразии в тектоническом, литологическом и гидрогеологическом отношениях для них всех характерна пространственная макро- и микронеоднородность продуктивного пласта. Даже кажущиеся однородными мощные пласты песчаников характеризуются существенной

изменчивостью [1–4]. Неоднородность пласта проявляется в пространственной изменчивости его строения, вещественного состава и петрофизических свойств слагающих его пород: гранулометрического состава, пористости, проницаемости, структуры и текстуры порового пространства, карбонатности, удельного электрического сопротивления, нефти и водонасыщенности и др.

Одной из важнейших гидродинамических характеристик пористой среды, от которой зависит ее про-

пуская способность, является проницаемость пород. Проницаемость существенно влияет практически на все технологические показатели разработки залежи.

Так, например, в результате анализа накопленной добычи нефти на месторождении Северные Бузачи (Казахстан) по скважинам основного фонда первого объекта установлено, что всего 30 скважин (8 % от скважинного фонда) обеспечивают 40 % накопленной добычи нефти. Эти скважины размещаются преимущественно в зонах повышенной трещиноватости и обладают повышенными ареалами дренирования [5].

Таким образом, при освоении нефтегазовой залежи участки с различной проницаемостью вырабатываются неравномерно (опережающим темпом вырабатываются высокопроницаемые прослои и участки), происходит быстрый рост обводненности и снижение темпов отбора нефти, формируются остаточные их запасы в низкопроницаемых зонах коллекторов [5–11].

Изучение характера неоднородности пород в пределах залежи нефти и газа имеет большое значение для подсчета запасов нефти и газа, проектирования ее разработки и контроля за воздействием на пласт. Особое значение приобретает влияние неоднородности на эффективность эксплуатации подземных газохранилищ (ПХГ), которые созданы на базе истощенных залежей.

В связи с этим изучению влияния неоднородности вмещающего подземного резервуара на эффективность эксплуатации ПХГ посвящен целый ряд специальных исследований [12–14].

Очевидно, что при обосновании режимов разработки и эксплуатации ПХГ, которые были созданы в истощенных подземных нефтегазовых резервуарах, необходимо учитывать унаследованный харак-

тер отработки залежи. Поэтому выявление особенностей изменения продуктивности скважин является актуальной задачей, решение которой может способствовать созданию более эффективной системы эксплуатации ПХГ.

Целью данного исследования является изучение продуктивности скважин на примере газоконденсатного месторождения / ПХГ Гарадаг (Азербайджан).

Краткая геологическая характеристика объекта исследования

Месторождение / ПХГ Гарадаг расположено в крайней юго-западной части Апшеронского полуострова, в 30 км от г. Баку. На юге месторождение охватывает широкую мелководную полосу Каспийского моря (рис. 1).

Нефтегазоносная структура Гарадаг, выявленная сейсморазведочными работами, представляет собой смятую антиклинальную складку с крутым ($35\text{--}60^\circ$) южным и более пологим ($30\text{--}35^\circ$) северным крыльями. Ось складки на севере имеет субмеридиональное, а на юге субширотное простирание. Широтная часть Гарадагской складки по своим размерам значительно больше, чем меридиональная. Вдоль оси проходит крупное нарушение с амплитудой смещения 200–300 м, имеется также ряд поперечных нарушений [15] (см. рис. 1).

Резервуар газа в VII+VIIa горизонтах Продуктивной толщи (ПТ, нижний плиоцен) состоит из совокупности блоков. В юго-восточной части южного крыла горизонты VII и VIIa объединяются и образуют единый толстый слой песчаников. В северо-западном направлении наблюдается уменьшение общей и эф-

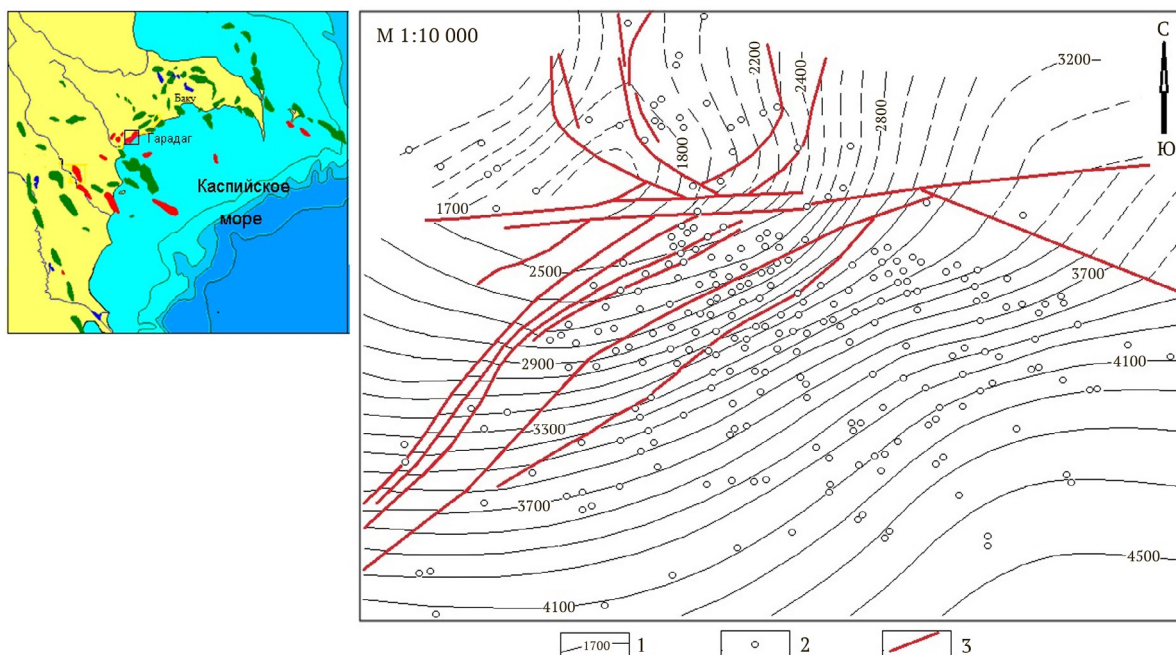


Рис. 1. Положение месторождения / ПХГ Гарадаг и структурная карта по кровле VII горизонта ПТ:
1 – изогипсы; 2 – скважины; 3 – нарушения

Fig. 1. Location of the Garadagh field/UGS and structural map along the top of horizon VII of the reservoir:
1 – structure contours; 2 – wells; 3 – disjunctive dislocations

фективной мощности VII–VIIa горизонтов, от 55–75 м юго-востоке до 10–25 м на северо-западе. Это уменьшение происходит за счет увеличения количества глинистых прослоек.

Эксплуатация месторождения Гарадаг начата в 1939 г. с разработки нефтегазовой залежи в V горизонте ПТ. Основными разрабатываемыми объектами являлись I–VII горизонты (верхний отдел ПТ), VIII горизонт (нижний отдел ПТ) и отложения верхнего миоцена, при средней глубине нефтегазоносных объектов 2750 м. Глубина залегания VII горизонта в сводовой части – 1900 м, в погруженной части – 4250 м (средняя глубина – 3125 м).

Газоконденсатная залежь с нефтяной оторочкой в VII–VIIa горизонтах введена в эксплуатацию в 1955 г. Залежь разрабатывалась без поддержания пластового давления и к концу 1980-х годов она была истощена. За период с 1955 по 1978 г. из VII–VIIa горизонтов было отобрано более 20,5 млрд м³ газа. Начальное пластовое давление равнялось 39 МПа, которое в конце разработки залежи снизилось до 3,5 МПа.

Созданное в истощенных залежах VII–VIIa горизонтов (далее упоминается как VII горизонт) ПТ ПХГ Гарадаг начало эксплуатироваться с 1986 г. В течение двух лет после введения ПХГ в эксплуатацию оно работало в режиме закачки, после чего было переведено в циклический режим «закачка/отбор», с постепенным наращиванием давлений и объема закачиваемого газа. С 2005 г., после передачи ПХГ в ведение ПО Азнефть, работа ПХГ контролируется на регулярной и систематической основе.

Основной объем закачиваемого в VII горизонт газа практически поступает лишь в часть (от трети до половины) первоначального объема резервуара¹.

¹ Каргер М. Д., Fidens S. A., Берман Л. Б., Нейман В. С. и др. Окончательный отчет по Проекту [Построение блочной фильтрационной модели подземного газохранилища Карадаг и рекомендации по системе закачки и отбора газа]. Баку; 2013. 103 с.

Исходные данные и подходы для реализации исследований

Анализ изменения эффективной мощности и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород VII горизонта ПТ газоконденсатного месторождения Гарадаг выполнен по данным геофизических исследований около 40 скважин и более 90 образцов керна.

Данные о продуктивности более 90 скважин легли в основу анализа изменения их в пространстве.

Анализ изменения в пространстве технологической характеристики скважин (по данным 18 скважин) ПХГ Гарадаг выполнен на примере объема циклической закачки и отбора газа в сезоне 2020–2021.

Обработка использованных данных и соответствующие графические построения проводились с помощью стандартных компьютерных программ (главным образом Excel, CorelDRAW и Corel Photo-Paint).

Результаты и их обсуждение

Анализ данных о продуктивности скважин и фазовом соотношении углеводородов (УВ) площади Гарадаг позволил установить неравномерное изменение этих параметров в пространстве. Как видно из рис. 2 и данных табл. 1 северо-восточная часть структуры отличается более высокой газонасыщенностью и, соответственно, более высокими дебитами газа расположенных здесь скважин, а также более высокими значениями газоконденсатного фактора (ГКФ).

На рис. 3 и 4 показаны карты, отражающие особенности изменения в пространстве суммарного объема закачиваемого и отбираемого из скважин газа на ПХГ Гарадаг.

Сравнение характера изменения в пространстве продуктивности скважин при разработке залежи и объема закачиваемого и отбираемого из скважин газа на ПХГ, указывает на определенную их схожесть. В обоих случаях скважины с высокими показателями приурочены преимущественно к северной, северо-восточной, присводовой части структуры.

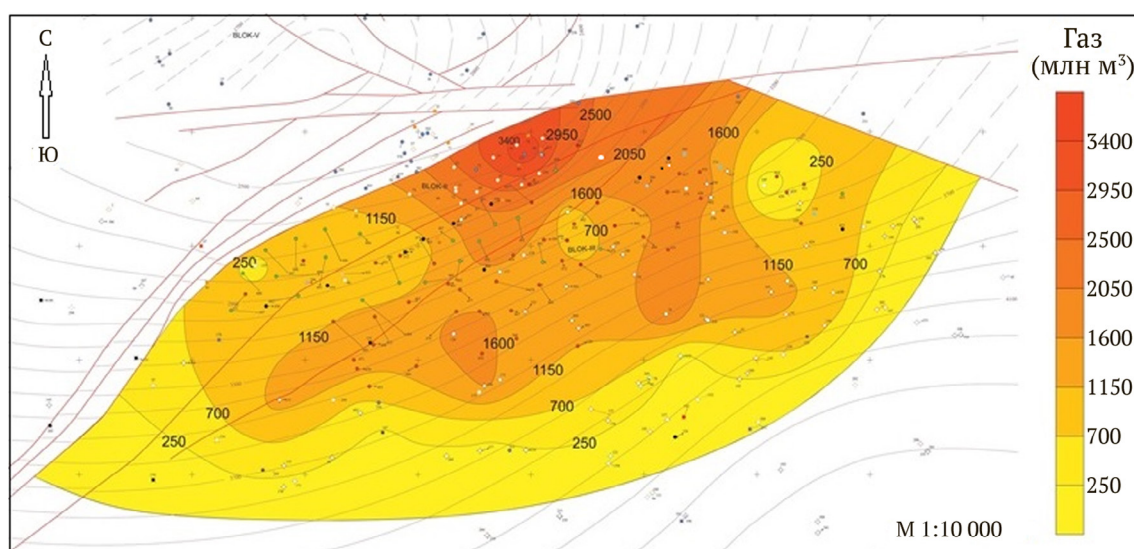


Рис. 2. Газоконденсатная залежь Гарадаг. Изменение в пространстве продуктивности скважин

Fig. 2. Garadagh gas condensate reservoir. Spatial variations of well productivity

Таблица 1 / Table 1

**Начальные газоконденсатный фактор
и выход конденсата в скважинах, расположенных
в разных частях структуры**

Initial gas-condensate ratio and condensate yield in wells
located in different parts of the structure

Положение скважины	№ скв.	Глубина фильтра, м	ГКФ, м ³ /т	Выход конденсата, г/см ³
Присводовая часть	140	2945	7631	131
» – «	155	2646–2661		145
» – «	212	3092–3129		136
Средняя часть	120	3310–3410	7000	143
ЮВ часть	105	3850–3944	5225	191
» – «	130	3993–4033		136
» – «	78	3815–3823	5200	192

Это позволяет сделать вывод о том, что параметры скважин как при разработке залежи, так и при эксплуатации ПХГ, определяются геологическими факторами, связанными со свойствами (неоднородностью) резервуара. Для проверки этого заключения был выполнен анализ изменения в пространстве ряда параметров резервуара: эффективной мощности продуктивного пласта, литологического состава и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород.

На рис. 5 и 6 показаны изменения в пространстве эффективной мощности продуктивного горизонта и песчанности пород резервуара, согласно которым значения этих параметров увеличиваются с ЮЗ на СВ.

Изменение в пространстве ФЕС пород резервуара имеет более дифференцированный характер (рис. 7). Тем не менее наглядно видны приуроченности наибольших значений пористости и проницаемости пород и наименьших – карбонатности – к присводовой части складки.

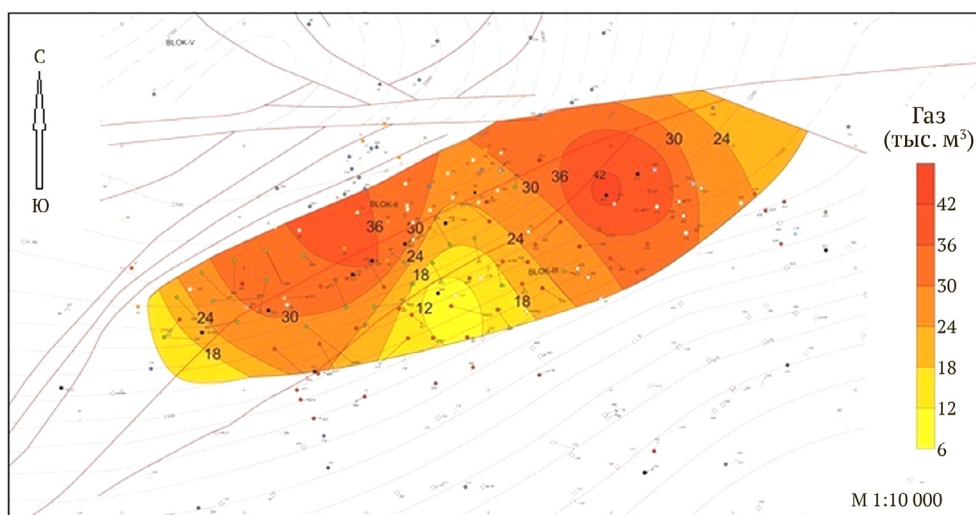


Рис. 3. ПХГ Гарадаг. Изменение в пространстве приемистости (объема закачанного газа) скважин

Fig. 3. Garadagh UGS. Spatial variations of well injectivity (volume of injected gas)

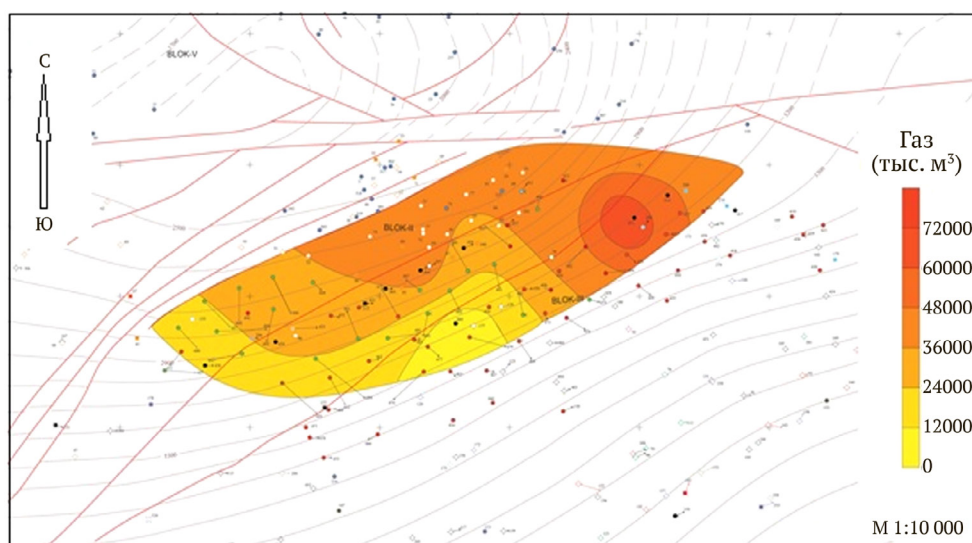


Рис. 4. ПХГ Гарадаг. Изменение в пространстве объема отбираемого из скважин газа

Fig. 4. Garadagh UGS. Spatial variations in the volumes of withdrawn gas (from wells)

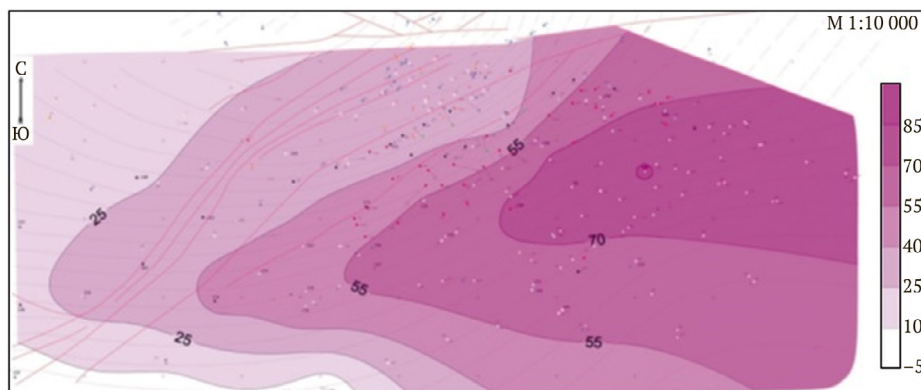


Рис. 5. Карта изменения по площади эффективной толщины VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг

Fig. 5. Map of net thickness variations of horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir

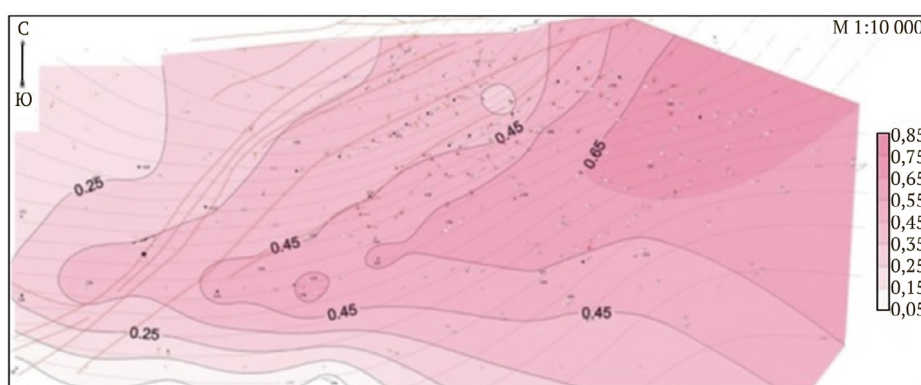


Рис. 6. Карта изменения песчанистости VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг

Fig. 6. Map of net-to-gross variations in horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir

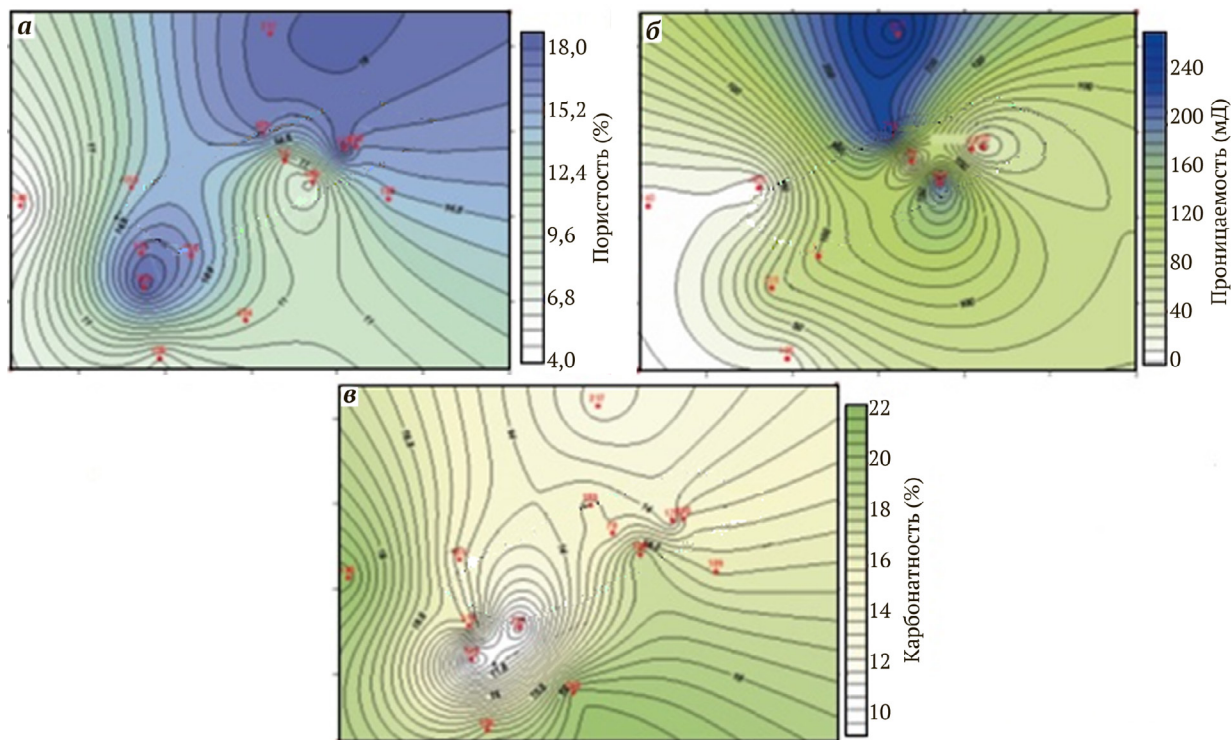


Рис. 7. Изменение по площади пористости (а), проницаемости (б) и карбонатности (в) пород VII горизонта ПТ месторождения / ПХГ Гарадаг (пунктиром указаны контуры ПХГ)

Fig. 7. Spatial variations of porosity (a), permeability (b) and carbonate content (c) in horizon VII of the Garadagh field/UGS reservoir (the dotted line indicates the UGS contours)

Изменчивость в пространстве литологического состава (коэффициент песчаности – Кпес.) и ФЕС пород отражается на количестве и качестве газоконденсатной продукции скважин (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Начальные значения газоконденсатного фактора и выхода конденсата в скважинах в зависимости от литологического состава и ФЕС пород

Initial values of gas-condensate ratio and condensate yield in wells depending on the reservoir lithological composition and poroperm properties

Скважина	Кпес.	Начальные параметры		ФЕС пород	
		ГКФ, м³/т	Выход конденсата, г/см³	Пористость, %	Проницаемость, мД
140	0,15...0,25	7631	131	4,2	3,1
120	0,55...0,65	7000	143	12,5	118
105	>0,65	5225	191	14,2	105

Неоднородность ФЕС пород резервуара находит свое отражение в изменении их газонасыщенности не только по площади, но и по разрезу VII горизонта, выявленного по данным газового каротажа.

Согласно осредненным газокоротажным кривым, приведенным на рис. 8, разрез скважины 473, расположенной в зоне с относительно благоприятными ФЕС пород, характеризуется более высоким содержанием УВ газов, в сравнении со скважиной 474, расположенной в зоне с относительно низкими ФЕС пород.

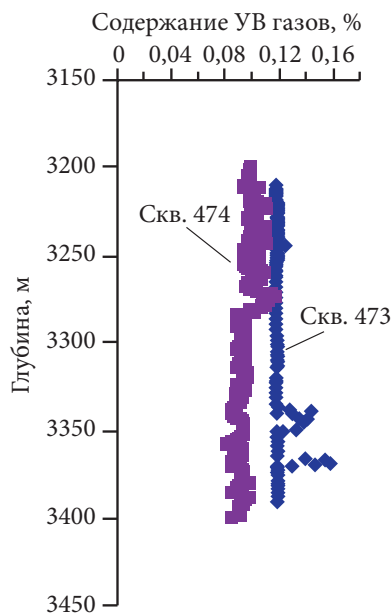


Рис. 8. Изменения по разрезу VII горизонта содержания УВ газов (по данным газового каротажа) в скважине 473 (расположена в зоне с благоприятными ФЕС пород) и скважине 474 (расположена в зоне с относительно низкими ФЕС пород)

Fig. 8. Variations in HC gases content along VII horizon (based on gas logging data) in well 473 (located in the area with favorable reservoir poroperm properties) and well 474 (located in the area with relatively unfavorable reservoir poroperm properties)

Особенности изменения ФЕС пород в пространстве определяют и режим эксплуатации ПХГ Гарадаг. Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что объемы закачки и отбора газа в период 2010–2012 гг. ниже в скважинах, расположенных в зоне с низкими ФЕС, в сравнении со скважинами, расположенными в зоне с более благоприятными значениями ФЕС горных пород.

Таблица 3 / Table 3

Объемы закачки и отбора газа на ПХГ Гарадаг в период 2010–2012 гг. в зависимости от ФЕС пород

Gas injection and withdrawal volumes at the Garadagh UGS in 2010–2012 depending on reservoir poroperm properties

Зоны / № скв.	Объемы закачки и отбора газа, тыс. м³			
	Сезон 2010–2011		Сезон 2011–2012	
	Закачка	Отбор	Закачка	Отбор
С низкими ФЕС:				
Скв. 453	28 698	26 703	33 768	34 632
Скв. 458	23 666	29 301	30 724	35 129
Скв. 467	12 783	24 982	29 199	34 460
Скв. 470	7766	9915	11 412	10 584
Скв. 471	13 212	10 146	27 136	26 852
Среднее	17 225	20 209	26 448	28 331
С высокими ФЕС:				
Скв. 450	59 567	48 508	59 035	60 876
Скв. 456	25 725	33 621	45 512	56 604
Скв. 459	47 483	45 703	55 544	49 788
Скв. 464	57 196	41 043	58 066	54 157
Скв. 465	54 066	44 157	60 528	52 264
Среднее	48 807	42 606	55 737	54 738

Таким образом, проведенный выше анализ подтверждает, что режим разработки залежи и эксплуатации ПХГ в значительной мере зависит от пространственной неоднородности резервуара.

Заключение

В результате проведенных исследований установлен неравномерный в пространстве характер изменения объемов закачиваемого и отбираемого газа на ПХГ Гарадаг, созданного в соответствующем истощенном газоконденсатном резервуаре.

Особенности режима эксплуатации ПХГ хорошо согласуются с особенностями режима разработки залежи (изменением в пространстве продуктивности скважин).

Унаследованный характер разработки залежи и эксплуатации ПХГ обосновывается неоднородностью резервуара, обусловленной пространственной изменчивостью литологического состава и ФЕС пород.

Учет неоднородности резервуара при проектировании режима эксплуатации ПХГ является важной предпосылкой повышения эффективности его эксплуатации.



Список литературы

1. Bonnell B., Hurich Ch. *Characterization of reservoir heterogeneity: an investigation of the role of cross-well reflection data*. Recorder, Canadian Society of Exploration Geophysicists. 2008;33(2):32–37. URL: <https://csegrecorder.com/articles/view/characterization-of-reservoir-heterogeneity>
2. Пулькина Н. Э., Зими́на С. В. *Изучение неоднородности продуктивных пластов*. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2012. 79 с. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PULKINANE/Educational_work/Tab/Study_inhomogeneous_formation_productivity.pdf
3. El-Deek I., Abdullatif O., Korvin G. Heterogeneity analysis of reservoir porosity and permeability in the Late Ordovician glacio-fluvial Sarah Formation paleovalleys, central Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;(10):400. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3146-2>
4. Harraz H. Z. *Reservoir heterogeneity*. Elsevier Inc.; 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25332.30080>
5. Соляной П. Н. *Оптимизация систем разработки залежей нефти с неоднородным коллектором сложного строения (на примере юрских отложений месторождений Кумколь и Северный Бузачи)*. [дисс. ... канд. техн. наук]. Уфа; 2018. 152 с.
6. Durlafsky L. J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media. *Mathematical Geology*. 2000;(32):421–438. <https://doi.org/10.1023/A:1007521831889>
7. Белозёров В. Б. Влияние фациальной неоднородности терригенных коллекторов на разработку залежей углеводородов. *Известия Томского политехнического университета*. 2011;319(1):123–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16463780>
8. Naderi M., Rostami B., Khosravi M. Effect of heterogeneity on the productivity of vertical, deviated and horizontal wells in water drive gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;23:481–491. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.02.027>
9. Данилов Д. С., Хакимзянов И. Н., Петров В. Н. Повышение эффективности разработки неоднородных терригенных коллекторов на примере бобриковских отложений Ново-суксинского нефтяного месторождения. В: *Булатовские чтения. Материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.)*. 2020;2:170–175. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-170-175.pdf>
10. Мингазутдинова Р. Ф., Ибрагимов И. И. О размещении добывающих и нагнетательных скважин при неоднородности пласта-коллектора по проницаемости. В: *Булатовские чтения. Материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.)*. 2020;2:321–323. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-321-323.pdf>
11. Фейзуллаев А. А., Велиева Э. Б., Рамазанов Р. А., Исмаилова Г. Г. Об изменении петрофизических свойств пород в связи с падением давления в длительно разрабатываемых нефтегазовых месторождениях. *Новости геофизики в Азербайджане*. 2013;(3):3–14.
12. Зубарев С. А. *Развитие технологий мониторинга за объектом подземного хранения газа (На примере Центрального ПХГ)*. [автореф. дис.... канд. техн. наук]. Ухта; 2010. 21 с.
13. Семенов Е. О. *Особенности формирования и оценка коллекторских и экранирующих свойств терригенных пород при создании подземных хранилищ газа в водоносных пластах* [автореф. дисс.... канд. геол.-мин. наук]. М.; 2010. 22 с.
14. Фейзуллаев А. А., Годжаев А. Г., Исмаилова Г. Г., Мирзоева Д. Р. Анализ влияния литофациальной неоднородности резервуара на режим эксплуатации подземного газохранилища Галмас (Азербайджан). *Нефтегазовая геология. Теория и практика*. 2017;12(3):1–13. https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2017
15. Ализаде А. А. (ред.) *Геология Азербайджана*. Том VII. Нефть и газ. Баку: Nafta-Press; 2008. 672 p.

References

1. Bonnell B., Hurich Ch. *Characterization of reservoir heterogeneity: an investigation of the role of cross-well reflection data*. Recorder, Canadian Society of Exploration Geophysicists. 2008;33(2):32–37. URL: <https://csegrecorder.com/articles/view/characterization-of-reservoir-heterogeneity>
2. Pulkina N. E., Zimina S. V. *Study of reservoir heterogeneity*. Manual for graduate students. Tomsk: Publ. House of Tomsk Polytechnical University; 2012. 79 p. (In Russ.). URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/p/PULKINANE/Educational_work/Tab/Study_inhomogeneous_formation_productivity.pdf
3. El-Deek I., Abdullatif O., Korvin G. Heterogeneity analysis of reservoir porosity and permeability in the Late Ordovician glacio-fluvial Sarah Formation paleovalleys, central Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*. 2017;(10):400. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3146-2>
4. Harraz H. Z. *Reservoir heterogeneity*. Elsevier Inc.; 2019. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25332.30080>
5. Solyanoi P. N. *Optimization of development methods for oil deposits with heterogeneous reservoir of complex structure (through the example of the Kumkol and Severny Buzachi Jurassic deposits* [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Ufa; 2018. 152 p. (In Russ.).
6. Durlafsky L. J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media. *Mathematical Geology*. 2000;(32):421–438. <https://doi.org/10.1023/A:1007521831889>



7. Belozerov V. B. Influence of facies heterogeneity of terrigenous reservoirs on hydrocarbon deposit development. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2011;319(1):123–130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16463780>
8. Naderi M., Rostami B., Khosravi M. Effect of heterogeneity on the productivity of vertical, deviated and horizontal wells in water drive gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2015;23:481–491. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.02.027>
9. Danilov D. S., Khakimzyanov I. N., Petrov V. N. Efficiency increase of development for terrigenous collectors on the example bobrikovian reservoirs of Novo-Suksinskoye oil field. In: *Readings of A. I. Bulatov. Materials of IV International scientific and practical conference (on March 31, 2020)*. (In Russ.). 2020;2:170–175. URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-170-175.pdf>
10. Mingazutdinova R. F., Ibragimov I. I. About location of production and injection wells with the heterogeneity of the reservoir permeability. In: *Readings of A. I. Bulatov. Materials of IV International scientific and practical conference (on March 31, 2020)*. 2020;2:321–323. (In Russ.). URL: <http://id-yug.com/images/id-yug/Bulatov/2020/2/PDF/2020-2-321-323.pdf>
11. Feyzullayev A. A., Valiyeva E. B., Ramazanov R. A., Ismaylova G. G. About change of petrophysical properties of rocks in connection with pressure drop in long developed petroleum fields. *Geophysics News in Azerbaijan*. 2013;(3):3–14. (In Russ.)
12. Zubarev S. A. *Development of monitoring technologies for an underground gas storage facility (through the example of the Central UGS facility)*. [Ph.D. thesis in Engineering Science]. Ukhta; 2010. 21 p. (In Russ.).
13. Semenov E. O. *Features of formation and assessment of poroperm properties of terrigenous rocks for creation of underground gas storages in aquifers*. [Abstract of Ph.D. Thesis in Geol.-Min. Sciences]. Moscow; 2010. 22 p. (In Russ.).
14. Feyzullayev A. A., Gojayev A. G., Ismaylova G. G., Mirzoyeva D. R. Analysis influence of the reservoir lithofacial heterogeneity of the operating mode of the underground gas storage Galmas (Azerbaijan). *Petroleum Geology. Theoretical and Applied Studies*. 2017;12(3):1–13. https://doi.org/10.17353/2070-5379/30_2017
15. Alizade A. A. (ed.) *Geology of Azerbaijan*. Vol. VII. Oil and Gas. Baku: Nafta-Press; 2008. 672 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Акпер Акпер оглы Фейзуллаев – доктор геолого-минералогических наук, профессор, действительный член Национальной академии наук Азербайджана, Институт геологии и геофизики, Национальная Академия Наук Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан, Scopus ID [24170958500](#), e-mail: fakper@gmail.com

Араз Гидаят оглы Годжаев – Управление эксплуатации газовых хранилищ, ПО «Азнефть», Государственная Нефтяная Компания Азербайджана, г. Баку, Республика Азербайджан, Scopus ID [57222324518](#)

Information about the authors

Akper A. Feyzullayev – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Institute of Geology and Geophysics, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan, Scopus ID [24170958500](#), e-mail: fakper@gmail.com

Araz G. Gojayev – Gas Storage Facility Operation Department, “Azneft” Production Association, State Oil Company of Azerbaijan Republic (SOCAR), Baku, Republic of Azerbaijan, Scopus ID [57222324518](#)

Поступила в редакцию 17.04.2021

Поступила после рецензирования 04.06.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 17.04.2021

Revised 04.06.2021

Accepted 15.06.2021



РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-114-120>

Горнодобывающая промышленность Мозамбика

Ж. Ж. З. Кайшау

“Vale Mozambique”, провинция Тете, Республика Мозамбик✉ jjacintlos@gmail.com

Аннотация

Сегодня Мозамбик называют «Восходящей звездой Южной Африки» во многом благодаря бурному развитию горнодобывающей промышленности. Минерально-сырьевой комплекс Мозамбика является одной из самых динамично развивающихся отраслей экономики. Основными партнерами для Мозамбика в последнее время стали Китай, Бразилия и Индия. В последнее время в стране реализуется ряд проектов, например, такие как добыча золота – Auroch Minerals Manica Gold. Увеличение объемов добычи угля связано с запуском карьера Moatize, который разрабатывает бразильская компания Vale, а также горной компанией Benga, принадлежащей индийскому консорциуму ICVL. Представленный в работе анализ добычи отдельных видов минерального сырья в Мозамбике позволяет получить общую картину о развитии горной промышленности в республике. Результаты анализа позволяют выявить причины негативных явлений, связанных со снижением добычи по отдельным видам минерального сырья. Так основными причинами снижения добычи угля стали падение производительности труда, ухудшение условий добычи, исчерпание наиболее доступных запасов угля, добываемых открытым способом. В этой связи весьма актуальным является развитие технологий подземной добычи со вскрытием глубоких месторождений комплексов вертикальных стволов. Опыт соседней Южно-Африканской республики показывает, что в горно-геологических условиях юга африканского континента могут успешно применяться скоростные технологии проходки стволов, что ускорит.

Ключевые слова

полезные ископаемые, горнодобывающая отрасль, горные компании, уголь, золото, железная руда, бентонит, графит, разрез, вскрытие месторождения, Мозамбик

Для цитирования

Кайшау Ж. Ж. З. Горнодобывающая промышленность Мозамбика. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):114–120. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-114-120>

MINERAL RESOURCES EXPLOITATION

Research article

Mining industry in Mozambique

J. J. Z. Caixao

“Vale Mozambique”, Tete province, Mozambique✉ jjacintlos@gmail.com

Abstract

At present time, Mozambique is called the “Rising Star of South Africa” mainly due to the rapid development of its mining industry. Mineral resources sector of Mozambique is one of the most dynamically developing sectors of the country's economy. China, Brazil and India have recently become the main partners for Mozambique. Recently, a number of projects is being implemented in the country, for example, Auroch Minerals Manica Gold in gold production. Increasing coal production is connected with commissioning of the Moatize open pit, which is being developed by Brazilian Vale Company, as well as Benga mining company owned by Indian ICVL consortium. The analysis of the extraction of certain mineral types in Mozambique presented in the paper demonstrates general picture of mining industry development in the country. The analysis findings allow identifying the causes of negative phenomena in the industry, manifesting themselves in decreasing production of certain types of minerals. For instance, the main reasons for the decline in coal production were dropping labor productivity, deterioration of mining conditions, and depletion of the most accessible coal reserves, extractable by open pit mining. In this regard, development of underground mining methods providing for opening of deep deposits by vertical shaft sets is highly relevant. The experience of the neighboring Republic of South Africa shows that, in the mining and geological conditions of the south of the African continent, high-speed shaft sinking methods accelerating deposit development can be successfully applied.

**Keyword**

minerals, mining, mining companies, coal, gold, iron ore, bentonite, graphite, cross-section, deposit opening, Mozambique

For citation

Caixao J. J. Z. Mining industry in Mozambique. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):114–120. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-114-120>

Краткая историческая справка

Республика Мозамбик – бывшая португальская колония на юге Африки – длительное время считалась одной из самых отсталых стран региона. Причиной такой ситуации была многолетняя гражданская война (1977–1992) с поистине ужасными последствиями: из 12-миллионного населения официально числятся погибшими около 1 млн человек [1].

После стабилизации политической ситуации в стране начался постепенный подъем экономики, а сегодня Мозамбик уже называют «Восходящей звездой Южной Африки» [2]. Так, ВВП страны за период с 2000 по 2019 г. в абсолютном выражении увеличился в 3 раза, а на душу населения – в 1,5 раза. Главенствующим фактором такого успеха стало интенсивное развитие горнодобывающего сектора экономики страны, которой обладает огромным потенциалом для дальнейшего поступательного развития. Действительно, согласно данным Африканского банка развития, горнодобывающая отрасль таких стран, как Мозамбик, Гана, Сьерра-Леоне, Либерия, Танзания и др., может обеспечить ежегодное поступление 30 млрд долл. США в государственные бюджеты этих государств в течение следующих 20 лет [3]. Недавно открытые на их территориях запасы нефти, газа, угля и других полезных ископаемых имеют большой промышленный потенциал и могут рассматриваться в качестве высоколиквидных активов на мировом рынке.

Основные игроки на рынке

Основными партнерами в развитии минерально-сырьевого комплекса для Мозамбика в последнее время стали Китай, Бразилия и Индия. Традиционно сильные позиции в регионе также имеют США, ЮАР, Португалия и Австралия. Интересы России в Мозамбике пока представлены мало, но ситуация может измениться после проведения в октябре 2019 г. в г. Сочи первого в истории саммита «Россия – Африка». Крупных игроков привлекают значительные запасы угля, бокситов, золота, полиметаллов и газа в республике. Например, общие доказанные запасы угля в Мозамбике, сосредоточенные прежде всего в бассейнах Moatize и Muscanha-Vuzi в северо-западной провинции Тете, на конец 2016 г. составили 25,6 млрд т, что позволяет называть Мозамбик последним неразработанным углехранилищем мира [3]. Сегодня в стране активно действуют десятки крупных компаний горнодобывающего и металлургического секторов экономики: Vale, Rio Tinto, Beacon Hill Resources, ENRC, ArcelorMittal, Tata Steel, Posco, Jindal Steel & Power и др. [4]

Бразильская Cia Vale do Rio Doce (Vale) получила разрешение на разработку угольного месторождения Moatize в 2008 г. и постоянно наращивает объемы до-

бычи. Австралийская Rio Tinto через свое подразделение Rio Tinto Mozambique с 2012 г. ведет разработку месторождения Benga в том же угольном бассейне. Чуть позже к добыче коксующегося и энергетического угля на месторождении Moatize приступила и индийская металлургическая компания Jindal Steel & Power (JSPL) [5]. Усилиями Baobab Resources (дочернее подразделение австралийской горнорудной корпорации Baobab Mining Services) ведутся работы и по добыче железной руды в провинции Тете [6, 7].

Современная картина**горнодобывающей промышленности страны**

Месторождения полезных ископаемых в Мозамбике весьма разнообразны и представлены каменным углем, бокситами, графитом, железной рудой, золотом, природным газом, алмазами. На территории страны также имеются разведанные запасы фосфатов, известняка, ванадия, титана, ильменита, свинца, берилла, бентонита, никеля и др.

В современной истории Мозамбика можно выделить два временных периода, когда благодаря грамотным правительственным реформам и привлечению зарубежных инвестиций произошел мощный рост добычи и объемов экспорта полезных ископаемых (рис. 1). Первый период датируется началом 2000-х годов, когда в республике появились крупные горные предприятия нового формата, второй относится к 2010–2011 гг. и связан с запуском крупных проектов по добыче угля и природного газа.

Особенности горнодобывающей промышленности Мозамбика более подробно рассмотрены на примере золоторудной и угольной промышленности.

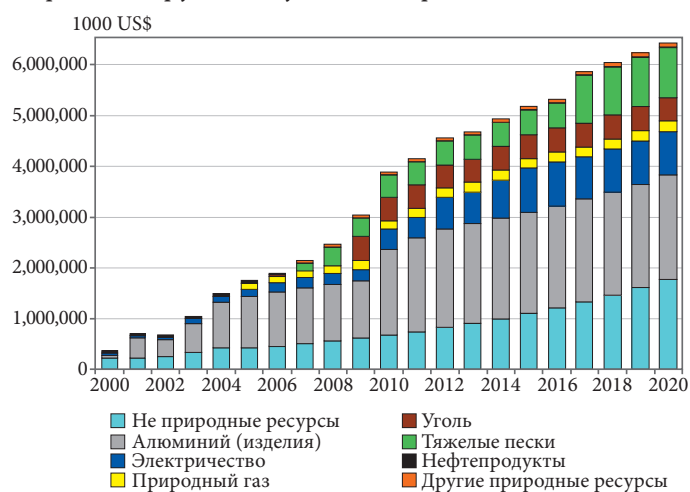


Рис. 1. Объем экспорта полезных ископаемых Мозамбика с 2000 по 2020 г.

Fig. 1. Mozambique mineral exports for 2000 through 2020

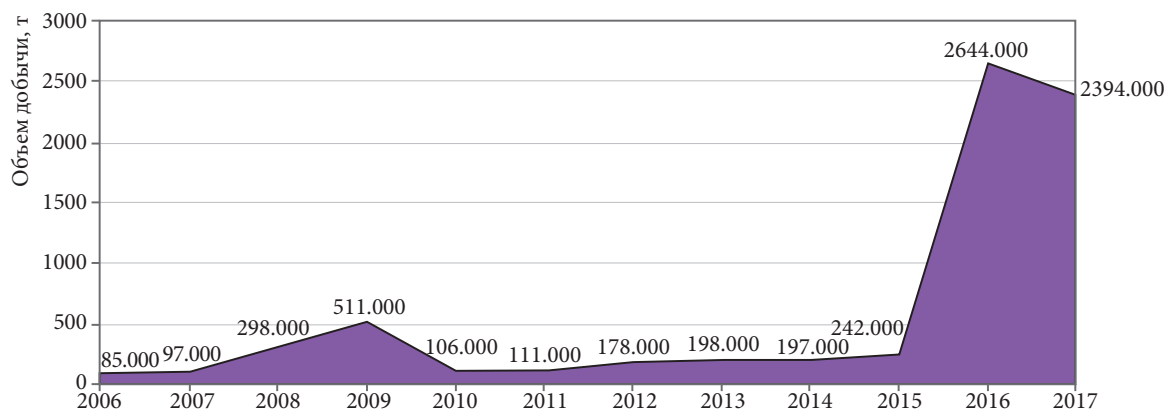


Рис. 2. Объем добычи золота в Мозамбике за период с 2006 по 2017 г.

Источник: United States Geological Survey, www.ceicdata.com

Fig. 2. Gold production in Mozambique for 2006 through 2017

Source: United States Geological Survey, www.ceicdata.com

Добыча золота в стране обеспечивается в основном за счет проекта Aueroch Minerals Manica Gold. Добыча ведется открытым способом, самым крупным является карьер Шериса, а максимальный объем добытого золота в 2016 г. составил 2644 т (рис. 2) [8, 9].

Резкое увеличение объемов добычи угля в стране (рис. 3) связано с карьером Moatize, который разрабатывает бразильская компания Vale. Объем инвестиций только в 2011 г. составил около 2,0 млрд долл. США. В настоящее время в Vale-Mozambique работает около 8000 человек.

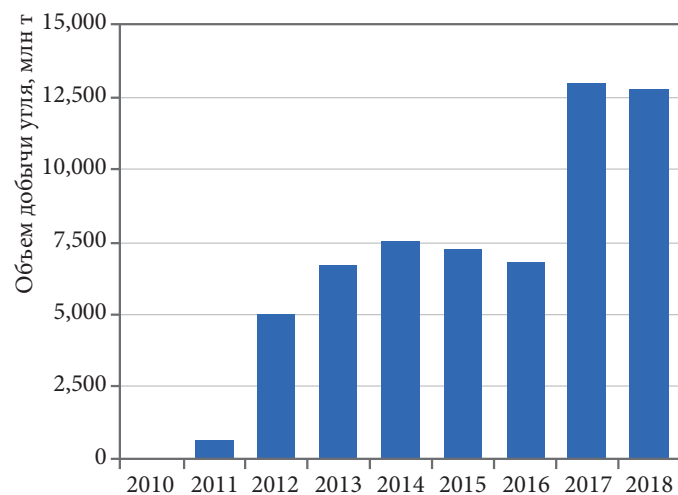


Рис. 3. Объем добычи угля в Мозамбике за период с 2006 по 2017 г.

Источник: Сводка отчета Добыча угля в Мозамбике в 2019. URL: <https://www.woodmac.com/reports/coal-mozambique-coal-supply-summary-15943759#:~:text=Mozambique's%20coal%20production%20is%20set,overburden%20removal%20and%20adverse%20weather> (Дата обращения: 25.11.2020)

Fig. 3. Coal production in Mozambique for 2006 through 2017

Source: 2019 Mozambique Coal Production Summary Report. URL: <https://www.woodmac.com/reports/coal-mozambique-coal-supply-summary-15943759#:~:text=Mozambique's%20coal%20production%20is%20set,overburden%20removal%20and%20adverse%20weather> (Accessed: 25.11.2020)

Второй по крупности угольный карьер страны – Benga – в настоящее время принадлежит индийскому консорциуму ICVL, купившему 65% предприятия у Rio Tinto в 2014 г. В 2015 г. Benga пережил трудные времена из-за низкого спроса на энергетический уголь, а также логистических сложностей.

Изначально считалось, что к 2018 г. в Мозамбике могут быть достигнуты объемы добычи угля порядка 40 млн т в год, однако в 2019 г. они составили только 12 млн т (снижение на 11% к прошлому году). Основными причинами стали падение производительности труда, ухудшение условий добычи, исчерпание наиболее доступных запасов угля, добываемых открытым способом.

В ноябре 2019 г. Vale объявила, что планирует закрыть предприятие на трехмесячный период в 2020 г. и решила пересмотреть свой план горных работ, чтобы сосредоточиться на производстве большего процента металлургического угля [10].

Достаточно интенсивно в стране развивается добыча графита, что обусловлено увеличением мирового спроса на литий-ионные аккумуляторы. Центр добычи графита в Мозамбике сосредоточен в провинции Кабо-Дельгаду, на севере страны. По данным Геологической службы США, в 2017 г. в Мозамбике было добыто 23 000 т графита. Это пятый показатель по объемам добычи в мире. В стране ведут деятельность три основных игрока: Syrah Resources (графитовая шахта «Balama»), BatteryMineral (проект «Monterpuez») и Triton Minerals (проект «Ancuabe») [11].

В последние годы ведется технико-экономическое обоснование проектов добычи ильменита, рутила, циркона из обширных залежей тяжелого минерального песка, расположенных вдоль береговой линии Мозамбика протяженностью около 2700 км. Так, месторождение «Chibuto», по оценкам экспертных организаций, является одним из крупнейших в мире по содержанию тяжелых минералов. Австралийский WMC3 в 2003 г. оценил его запасы в 1765 млн т при содержании ильменита 4,14%. Прогнозный срок отработки составляет не менее 100 лет [12].

В ряде регионов страны налажена промышленная добыча бентонитов. В Боане содержатся запасы бентонита объемом 15 млн т при средней мощности слоя 6,0 м. Общие запасы месторождения «Boane-Requenos Libombos» оценены в размере от 2,5 до 4,2 млн т в зависимости от их категории. В Боане продолжается производство низкосортного бентонита на экспорт [13]. Добычу и экспорт сырья в основном ведут мелкие и средние компании.

Большим промышленным потенциалом обладают месторождения строительных материалов, цветных металлов, железной руды и др. Страна активно вкладывает значительные средства в горнодобывающую отрасль, реализуются программы по обучению студентов в ведущих горных университетах, к реализации проектов приглашаются транснациональные компании, имеющие хорошую репутацию на рынке. Постепенно развивается и транспортная инфраструктура страны. Например, казахская компания Eurasian Natural Resources Corporation «ENRC» сегодня занимается проектированием и строительством новой железнодорожной ветки из богатой углем провинции Тете в порт Накала.

Направления эффективного развития геотехнологий вскрытия месторождений

Несмотря на достигнутые успехи за прошедшие годы заголовки в отчетах «World Coal» о восстановлении угольной промышленности Мозамбика после почти 20 лет гражданской войны сместились с оптимистичного «Мир и процветание» на предупреждающие «Куда-то иду, медленно». Долгосрочный правительственный прогноз, основанный на запасах существующих и перспективных горных предприятий (116–120 млн. т. угля к 2030 г.), – сегодня кажется мало реалистичным. Для выполнения таких амбициозных планов требуется не только количественный, но и качественный рост горнодобывающей отрасли страны [14].

Он может быть связан с развитием подземного способа добычи полезных ископаемых. Вскрытие глубоких месторождений может осуществляться комплексом вертикальных и (или) наклонных стволов. Богатый опыт соседней Южно-Африканской республики показывает, что полезные ископаемые Южной Африки характеризуются большой глубиной залегания. В таких условиях применяются ступенчатые схемы вскрытия (рис. 4). Неслучайно в десятку самых глубоких горнодобывающих предприятий мира входит 8 рудников из Южно-Африканской республики, отрабатывающих запасы на глубине 3–4,5 км.

Условия проходки стволов при этом можно считать достаточно благоприятными. Они характеризуются высокой крепостью вмещающих пород, отсутствием водоносных горизонтов большой мощности, а также отсутствием значительной сейсмической и тектонической активности. Это позволяет с успехом применять следующие скоростные технологии проходки стволов:

1) Буровзрывная проходка по параллельной технологической схеме, предусматривающей использование многоэтажного проходческого полка, высокопроизводительных бурильных установок и погрузочных машин. Крепление ствола осуществляется с отставанием от забоя до 30 м с применением секционной опалубки одновременно с уборкой породы в забое. Устойчивость призабойной зоны обеспечивается установкой временной крепи из анкеров, сетки и торкрет-бетона (рис. 5). Параллельность работ по уборке породы в забое ствола и возведению постоянной крепи с проходческого полка обеспечивает темпы проходки до 100 м/месяц и более.

2) Проходка стволов бурением на полное сечение или с передовой скважиной с применением высокопроизводительных буровых машин нового поколения. К таким, в частности, относится буровой комплекс компании Redbore 100, способный вести бурение стволов диаметром до 8 м на глубину свыше 1000 м в скальных породах. В качестве крепи в этом случае целесообразно использовать высокопрочный торкрет-бетон или фибро-торкрет-бетон.

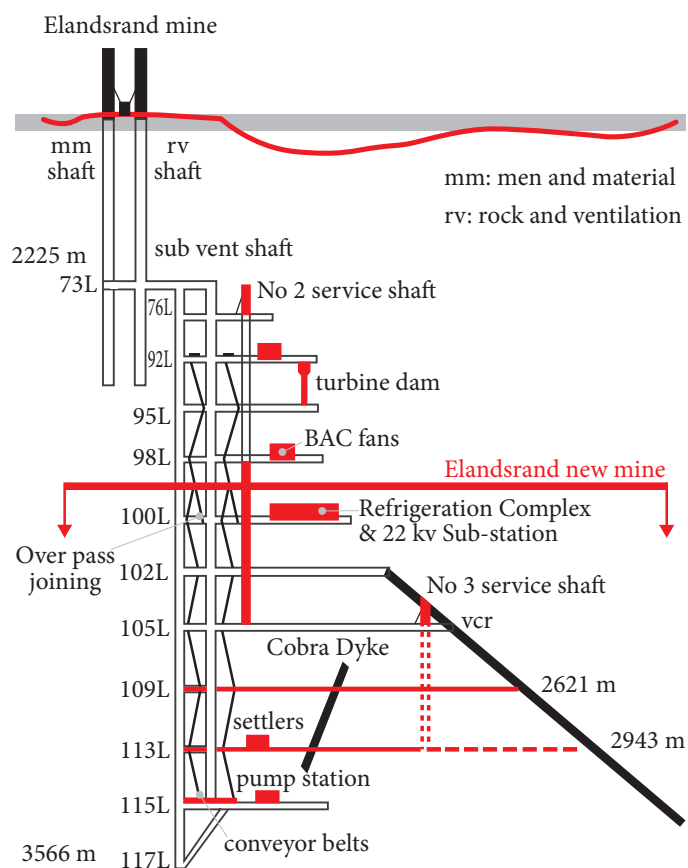


Рис. 4. Ступенчатая схема вскрытия рудника Elandsrand mine (ЮАР)

Источник: http://test.labelproductions.com/News/24-September-2013/The_top_ten_deepest_mines_in_the_world.html

Fig. 4. Elandsrandmine mine stepped opening arrangement (South Africa)

Source: http://test.labelproductions.com/News/24-September-2013/The_top_ten_deepest_mines_in_the_world.html



Рис. 5. Проходка ствола по параллельной технологической схеме в Южной Африке

Источник: <https://www.ivanhoemines.com/news/2017/ivanhoe-mines-issues-financial-results-and-review-of-operations-for-the-first-quarter-of-2017/>

Fig. 5. Shaft sinking parallel process flow in South Africa
Source: <https://www.ivanhoemines.com/news/2017/ivanhoe-mines-issues-financial-results-and-review-of-operations-for-the-first-quarter-of-2017/>

Обе технологии характеризуются максимально высокими технико-экономическими показателями строительства стволов. Важным достоинством параллельной технологической схемы также является обеспечение возможности разгрузки призабойной зоны до возведения основной крепи. Благодаря этому величина нагрузок на последнюю уменьшается в 2,5–3 раза, что в свою очередь позволяет применять крепи с максимальной толщиной 300–400 мм. Параллельная технологическая схема проходки стволов позволяет перейти на стадийную схему проектирования, когда по данным мониторинга оперативно уточняются и корректируются принятые изначально параметры крепи [13, 15].

Существенным преимуществом технологии проходки стволов бурением является то, что она не требует нахождения людей в забое и позволяет автоматизировать основные процессы проходческого цикла.

Заключение

Проведенный краткий анализ горнодобывающей промышленности Мозамбика позволяет с уверенностью говорить о том, что данная отрасль по праву считается локомотивом экономики страны, но для повышения ее эффективности необходимо внедрение лучших геотехнологий, основанных на передовых достижениях в области горного дела.

Освоению месторождений всегда должен предшествовать глубокий анализ, который определит обоснованный выбор геотехнологических решений по вскрытию и отработки месторождений с учетом всех рисков, капитальных затрат, инвестиционной привлекательности, а также других факторов.

Государство должно создать условия для развития горнопромышленного сектора экономики страны, определяя его инвестиционную привлекательность для зарубежных инвесторов, обеспечивая эффективную налоговую систему для реализации проектов и развивая промышленную инфраструктуру.

Список литературы

1. Шагалов В. А. Гражданская война в Мозамбике и миротворческая операция ООН. *Ученые записки Казанского университета. Серия: Гуманитарные науки*. 2013;155(1):257–266. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19068534>
2. Зайцев О. *Восходящая звезда Южной Африки*. URL: https://rusmet.ru/voshodyashchaya_zvezda_juzhnoy_afriki (Дата обращения: 25.11.2020)
3. Картунов А. В., Цайзер Н. Г., Харитонов Е. В., Кочофа Г. А., Ежов Д. П., Чкония Л. Е. *Африка – Россия+: достижения, проблемы, перспективы: совместный доклад Российского совета по международным делам (РСМД) и СОЮЗА «Африканская деловая инициатива» (АДИ)*. Доклад № 53/2020. Российский совет по международным делам (РСМД). М.: НП РСМД, 2020. 60 с.
4. Дейч Т. Л., Усов В. А. «Восходящие» державы на африканском континенте: пример Мозамбика. *Азия и Африка сегодня*. 2014;(2):30–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21335746>
5. Дейнека О. С., Матемуллане Ж. З. С. Образ экономической политики и отношение к государству у граждан Мозамбика (результаты интернет-исследования). *Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 12. Психология. Социология. Педагогика*. 2012;(1):80–89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17637116>
6. Саликов Ю. А., Силва С. Д. К. Проблемы и пути стратегического развития промышленности республики Мозамбик. *Экономика. Инновации. Управление качеством*. 2013;(2):4–7. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18931498>



7. Шульгина Л. В., Силва С. Д. К. Модернизация и структурные преобразования экономики (на примере Южноафриканских государств и республики Мозамбик). *ФЭС: Финансы. Экономика*. 2012;(7):5–8.

8. Силима П. П. Особенности развития горнодобывающего сектора промышленности в Мозамбике. *Управление экономическими системами*. 2019;(3). 28 с. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39385022>

9. Silima P. P. Fact sheets on mining sector industry in Southern Africa – Mozambique and South Africa. *Innovacii i investicii*. 2020;(2):61–65.

10. «Vale on Base Metals and Coal businesses impairment tests», Media Release, November 26, 2019. Код доступа: <http://www.vale.com/EN/investors/information-market/Press-Releases/Pages/Vale-on-Base-Metals-and-Coal-businesses-impairment-tests.aspx> (Дата обращения 26.11.2020 г.).

11. 10 Ведущих стран-производителей графита. Thermal & material engineering center. URL: <https://econet.ru/articles/10-veduschih-stran-proizvoditeley-grafita> (Дата обращения 26.11.2020 г.)

12. Lehto T., Gonçalves R. *Mineral resources potential in Mozambique*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237447668> (Дата обращения 26.11.2020 г.)

13. Плешко М. С., Курнаков В. А. Анализ нормативной базы и научных исследований в области крепления вертикальных стволов, направления их дальнейшего развития. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(4):49–53. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2011/4/Pleshko-Kurnakov_4_2011.pdf

14. Baxter B. *Mozambique's coal revival*. Coaltrans. URL: <https://www.coaltrans.com/insights/article/mozambiques-coal-revival> (Дата обращения 26.11.2020 г.).

15. Плешко М. С., Плешко М. В. Инновационные подходы к проектированию конструкций крепи глубоких вертикальных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012;(7):223–227. URL: https://giab-online.ru/files/Data/2012/7/223-227_Pleshko_Pleshko_-_5_str.pdf

References

1. Shagalov V. A. The civil war in Mozambique and the UN peacekeeping operation. 2013;155(1):257–266. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Gumanitarnye Nauki*. 2013;155(1):257–266. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19068534>

2. Zaitsev O. *Rising star of South Africa*. (In Russ.). URL: https://rusmet.ru/voshodyashchaya_zvezda_juzhnoy_afriki (Accessed: 25.11.2020)

3. Kortunov A. V., Tsayzer N. G., Kharitonova E. V., Kochofa G. A., Ezhov D. P., Chkoniya L. E. *Africa – Russia+: Achievements, Problems, Prospects: Joint Report of the Russian Council on International Affairs (RCIA) and the UNION “African Business Initiative” (ABI)*. (Report No. 53/2020). Russian Council on International Affairs (RCIA). Moscow: HP RCIA Publ.; 2020. 60 p. (In Russ.).

4. Deych T. L., Usov V. A. Emerging powers in Africa: Mozambique case. *Asia and Africa Today*. 2014;(2):30–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21335746>

5. Deyneka O. S., Matemulane J. Z. S. The image of economic policy and the citizens' attitude toward the state of Mozambique (the results of an internet research). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Seria 12, Psihologia, sociologia, pedagogika*. 2012;(1):80–89. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17637116>

6. Salikov U. A., do Carmo S. S. Problems and ways of strategic industrial development of Mozambique. *Ekonomika. Innovatsii. Upravlenie kachestvom*. 2013;(2):4–7. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=18931498>

7. Shul'gina L. V., Silva S. D. K. Modernization and structural transformation of economy (through the example of the South African states and the Republic of Mozambique). *Finansy, ekonomika, strategiya*. 2012;(7):5–8. (In Russ.).

8. Silima P. P. Features of mining industry development in Mozambique. *Upravlenie ekonomicheskimi sistemami*. 2019;(3). 28 p. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39385022>

9. Silima P. P. Fact sheets on mining sector industry in Southern Africa – Mozambique and South Africa. *Innovacii i investicii*. 2020;(2):61–65.

10. «Vale on Base Metals and Coal businesses impairment tests», Media Release, November 26, 2019. Код доступа: <http://www.vale.com/EN/investors/information-market/Press-Releases/Pages/Vale-on-Base-Metals-and-Coal-businesses-impairment-tests.aspx> (Accessed: 26.11.2020 r.)

11. 10 leading country-producers of graphite. Thermal&material engineering center. (In Russ.). URL: <https://econet.ru/articles/10-veduschih-stran-proizvoditeley-grafita> (Accessed: 26.11.2020 r.)

12. Lehto T., Gonçalves R. *Mineral resources potential in Mozambique*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/237447668> (Accessed: 26.11.2020 r.)

13. Pleshko M. S., Kurnakov V. A. Analysis of the regulatory framework and scientific research in the field of vertical shaft supporting. Trends of their further development. *Mining informational and analytical bulletin*. 2011;(4):49–53. (In Russ.). URL: https://giab-online.ru/files/Data/2011/4/Pleshko-Kurnakov_4_2011.pdf



14. Baxter B. *Mozambique's coal revival*. Coaltrans. URL: <https://www.coaltrans.com/insights/article/mozambiques-coal-revival> (Accessed: 26.11.2020 г.).

15. Pleshko M.S., Pleshko M.V. Innovative approaches to designing support structures for deep vertical shafts. *Mining informational and analytical bulletin*. 2012;(7):223–227. (In Russ.). URL: https://giab-online.ru/files/Data/2012/7/223-227_Pleshko,_Pleshko_-_5_str.pdf

Информация об авторе

Жохан Жасинту Зека Кайшау – горный инженер, “Vale Mozambique”, провинция Тете, Республика Мозамбик, e-mail: jjacintlos@gmail.com

Information about the author

Johan Jacinto Zeca Caixao – Mining Engineer, “Vale Mozambique”, Tete province, Mozambique, e-mail: jjacintlos@gmail.com

Поступила в редакцию 27.11.2020

Поступила после рецензирования 19.04.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 27.11.2020

Revised 19.04.2021

Accepted 15.06.2021



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>**Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам****Тхань Лич До***Профессионально-технический колледж, г. Далат, Вьетнам*✉ lichdalat@gmail.com**Аннотация**

Глиноземное производство является сложным, энергоемким технологическим процессом переработки минерального сырья, что определяет необходимость создания рациональных технологических решений, в том числе с точки зрения эффективности использования электрической энергии. В статье приведено описание системы электроснабжения глиноземного завода в провинции Лам Донг, Вьетнам. Проанализированы задачи, которые необходимо решить, чтобы улучшить качество электроэнергии системы электроснабжения. Показано, что наличие нелинейных нагрузок существенно ухудшает качество электрической энергии, что в свою очередь приводит к повреждению оборудования, ошибочным операциям и снижению производительности завода. Разработаны модели системы электроснабжения завода, с помощью которых была проведена оценка качества электроэнергии на общей шине напряжением 6 кВ системы электроснабжения, а также на шинах 6 и 0,4 кВ распределительных подстанций отдельных подразделений завода. Анализ результатов моделирования показывает, что наличие нелинейных нагрузок приводит к значительным искажениям синусоидальных форм напряжений и токов, снижению коэффициента мощности. На основании результатов моделирования сделан вывод, что гармоники напряжения и гармоники тока при нелинейной нагрузке на шинах напряжением 0,4 и 6 кВ превышают допустимый международным стандартом IEEE ST519-1992 предел гармоник. Разработаны предложения по решению проблемы повышения качества электроэнергии в системе электроснабжения завода. Для компенсации высших гармоник тока и напряжения рекомендовано применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии. Предложено в качестве регуляторов качества электроэнергии использовать активные фильтры гармоник. Предложенные решения позволяют получить практически синусоидальные формы напряжений и токов в системе электроснабжения глиноземного завода.

Ключевые слова

глиноземное производство, система электроснабжения, качество электроэнергии, нелинейные нагрузки, моделирование, высшие гармоники, компенсация, фильтр

Для цитирования

До Тхань Лич. Исследование, оценка и предложения по решению проблемы качества электроэнергии для системы электроснабжения глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):121–127. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research article

Research, assessment and proposals on resolving power quality problem for the power supply system of Lam Dong alumina refinery, Vietnam**Thanh Lich Do***Dalat Vocational College, Da Lat, Vietnam*✉ lichdalat@gmail.com**Abstract**

Alumina production is rather complex technological process of processing mineral raw materials that requires development of effective technological solutions, including in terms of efficiency of using electric energy. The paper is devoted to studying the power supply system of an alumina refinery in Lam Dong Province, Vietnam. The tasks that need to be solved for improving the power quality in the power supply system were analyzed.

It was shown that non-linear loads significantly degrade the power quality that in turn leads to equipment damage, malfunction and decreasing the refinery productivity. Models of the refinery power supply system were developed and, using which, the quality of power was assessed at the 6 kV voltage utility bus of the power supply system, as well as at the 6 kV and 0.4 kV buses of distribution substations of individual refinery's subdivisions. Analysis of the simulation findings showed that the nonlinear loads lead to significant distortions of sinusoidal forms of voltages and currents, and decreasing the power factor. Based on the simulation results, it was concluded that voltage harmonics and current harmonics at nonlinear load at the low voltage buses of 0.4 kV and at the buses of 6 kV exceed the permissible limits of the harmonics in accordance with IEEE519-1992 international standard. Proposals were developed for improving the power quality in the refinery power supply system. For suppressing higher harmonics of current and voltage, it was recommended to use special power quality regulators in the alumina refinery power supply system. It was proposed to use active harmonic filters as the power quality regulators. The proposed solutions allowed obtaining practically sinusoidal forms of voltages and currents in the alumina refinery power supply system.

Keywords

alumina production, power supply system, power quality, non-linear loads, simulation, higher harmonics, compensation, filter

For citation

Do Thanh Lich. Research, assessment and proposals on resolving power quality problem for the power supply system of Lam Dong alumina refinery, Vietnam. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):121–127. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-121-127>

Введение

Глиноземное производство является важной составляющей алюминиевой промышленности, что определяет необходимость создания рациональных технологических решений, в том числе с точки зрения эффективности использования электрической энергии.

Глиноземный завод в Лам Донге – это крупный и важный проект вьетнамского государства, система электроснабжения которого не должна допускать перебоев в подаче электроэнергии. Для поддержания стабильности электроснабжения необходимо улучшение качества электроэнергии. Поэтому целью моделирования электрической системы глиноземного завода в Лам Донге, Вьетнам, являются изучение и анализ характеристик системы электроснабжения с учетом нелинейных нагрузок. Наличие нелинейных нагрузок существенно ухудшает качество электриче-

ской энергии, что приводит к повреждению оборудования, ошибочным переключениям и, как следствие, снижению производительности завода.

Глиноземный завод в Лам Донге производит 650 тыс. т глинозема в год. Электроэнергия на глиноземный завод поступает от двух линий электропередачи напряжением 110 кВ. На самом заводе построены две трансформаторные подстанции в 20 МВА для понижения напряжения со 110 до 6 кВ. Кроме того, на заводе строится резервная электростанция, состоящая из двух комплектов генераторов мощностью по 15 МВА. Выходное напряжение генераторов составляет 6 кВ. На рис. 1 представлена структура электроэнергетической системы глиноземного завода в Лам Донге. От двух трансформаторов 110/6 кВ напряжение 6 кВ подается на распределительные станции ПД-1...ПД-6. Рассмотрим назначение отдельных станций распределения электроэнергии

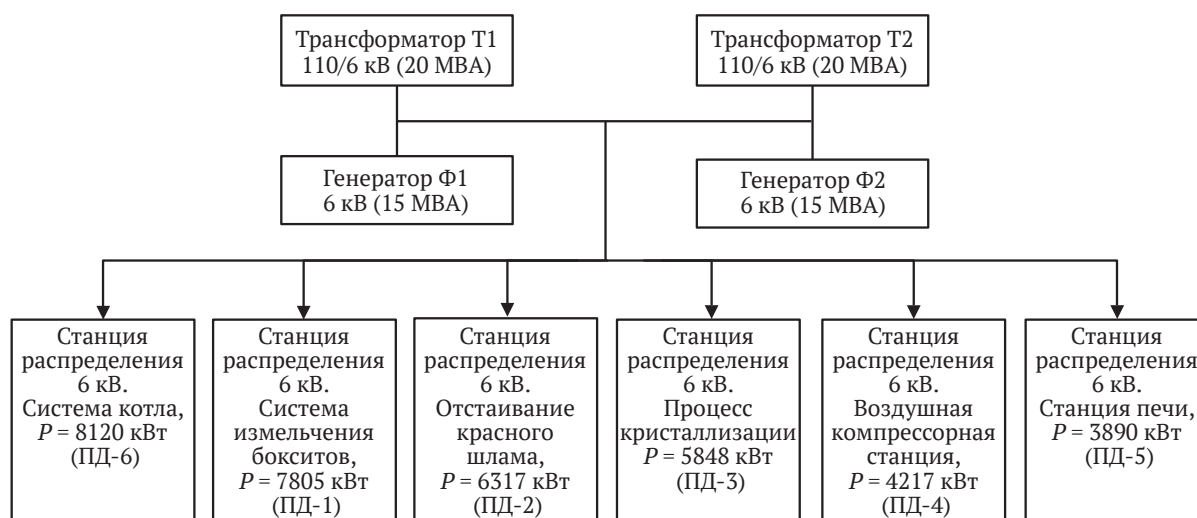


Рис. 1. Структура электроэнергетической системы глиноземного завода в Лам Донге

Fig. 1. Lam Dong alumina refinery electric power system configuration



ПД-1...ПД-6, что имеет большое значение к их соотношению к определенным технологическим процессам, которые реализуются на предприятии.

Станция распределения электроэнергии ПД-1 (6 кВ, 7805 кВт) питает электроэнергией систему измельчения бокситов. Для измельчения бокситов используется замкнутый процесс измельчения руды, состоящий из группы циклонов и набора шаровых мельниц из трех герметичных секций. Для транспортировки боксита используется конвейер.

Станция распределения электроэнергии ПД-2 (6 кВ, 6317 кВт) питает электроэнергией технологический процесс оттаивания красного шлама.

Станция распределения электроэнергии ПД-3 (6 кВ, 5848 кВт) питает электроэнергией двухстадийный технологический процесс кристаллизации, в котором используется 18 комплектов резервуаров для кристаллизации, из которых три комплекта – для кристаллизации на первом этапе, 15 – для кристаллизации на втором этапе.

Станция распределения электроэнергии ПД-4 (6 кВ) питает воздушную компрессорную станцию 4217 кВт.

От станции ПД-4 получают электроэнергию пять подстанций низкого напряжения 6/0,4 кВ с мощностями: $S_1 = 800$ кВА (станция распределения циркуляции кристаллизованной воды, $P_1 = 644$ кВт), $S_2 = 800$ кВА (станция распределения циркуляции сжатого воздуха, $P_2 = 596$ кВт), $S_3 = 800$ кВА (станция распределения циркуляции глиноземной воды, $P_3 = 674$ кВт), $S_4 = 630$ кВА (станция распределения низкого давления воздуха, $P_4 = 567$ кВт), $S_5 = 1000$ кВА (распределительная станция ремонтной мастерской, $P_5 = 900$ кВт, оборудованная системой электросварочных машин, токарных станков, строгальных станков и кранов).

Станция распределения электроэнергии ПД-5 (6 кВ) питает печь мощностью 3890 кВт, два вентилятора вакуумного насоса (6 кВ) мощностью 2×560 кВт, двигатель вытяжного вентилятора (6 кВ) мощностью 710 кВт, используемого для гидратных печей.

От станции ПД-5 получает электроэнергию распределительная система низкого напряжения 6/0,4 кВ, в состав которой входят три трансформатора с мощностями: $S_1 = 630$ кВА (станция распределения гидрата, $P_1 = 390$ кВт), $S_2 = 1250$ кВА (гидратная распределительная станция, $P_2 = 809$ кВт), $S_3 = 630$ кВА (водораспределительная станция, $P_3 = 571$ кВт).

Станция распределения электроэнергии ПД-6 (6 кВ) питает систему электроснабжения котла ($P = 8120$ кВт).

Опираясь на представленное описание функциональной привязки станций питания к технологическим объектам и процессам можно определить подходы к обеспечению качества электроэнергии во всей системе электроснабжения.

Особенности работы электротехнических комплексов и систем завода

Для регулирования скорости электродвигателей различных машин и механизмов широко используются преобразователи частоты, которые являются

нелинейной нагрузкой для системы электроснабжения. Наличие нелинейных нагрузок на шинах напряжением 0,4 кВ приводит к перегреву кабеля и повреждению изоляции. Также возможны перегрев двигателя, возникновение шума и колебаний крутящего момента на роторе, что приводит к механическому резонансу и вибрации. При наличии конденсаторных установок возможен их перегрев и в большинстве случаев разрушение диэлектрика. Под воздействием разных производственных и природных факторов устройства индикации и освещения могут работать не в стационарных режимах, защитные устройства в системах электроснабжения и управления могут аварийно отключаться, сети передачи данных и измерительное оборудование дают ложные результаты [1, 2]. Причиной таких явлений эксперты считают характер нагрузок в электроприводах машинного оборудования, которое участвует в реализации технологических процессов, а также наличие нелинейных элементов в системе электроснабжения при управлении электроприводами [3, 4]. Таким образом, наличие нелинейных нагрузок приводит к нарушению нормальной работы завода.

Модель системы электроснабжения глиноземного завода

Для моделирования системы электроснабжения используется программно-аппаратный комплекс а Matlab Simulink, имеющая в своем составе специализированную библиотеку, позволяющую создавать модели различных электротехнических комплексов и систем [5].

На рис. 2 показана визуальная модель схемы распределительной системы 110 кВ с двумя главными силовыми трансформаторами 110 / 6 кВ, 20 МВА. Схема системы 110 кВ состоит из двух линий, которые резервируют друг друга и соединены между собой через шину. Распределение электроэнергии на стороне 6 кВ осуществляется на шести распределительных подстанциях: распределительной станции ПД-1 системы измельчения бокситов ($P_{\text{ПД.1}} = 7805$ кВт); распределительной станции ПД-2 красного шлама ($P_{\text{ПД.2}} = 6317$ кВт), станции распределения кристаллизации ПД-3 ($P_{\text{ПД.3}} = 5848$ кВт); распределительной станции для компрессоров ПД-4 ($P_{\text{ПД.4}} = 4217$ кВт), распределительной станции печи ПД-5 ($P_{\text{ПД.5}} = 3890$ кВт), распределительной станции котельной ПД-6 ($P_{\text{ПД.6}} = 8120$ кВт). Система снабжена также резервным питанием от 2 генераторов напряжением 6 кВ, мощностью 15 МВА. На рис. 3 приведена визуальная модель распределительной системы станции ПД-1, входящая в состав модели электрической системы глиноземного завода в Лам Донге (рис. 2). Аналогичные модели разработаны для станций распределения электроэнергии ПД-2...ПД-6.

Представленные модели электротехнических комплексов и систем завода позволяют выявить режимы работы оборудования при разных особенностях реализации технологических процессов, а также определить их влияние на качество электроэнергии.

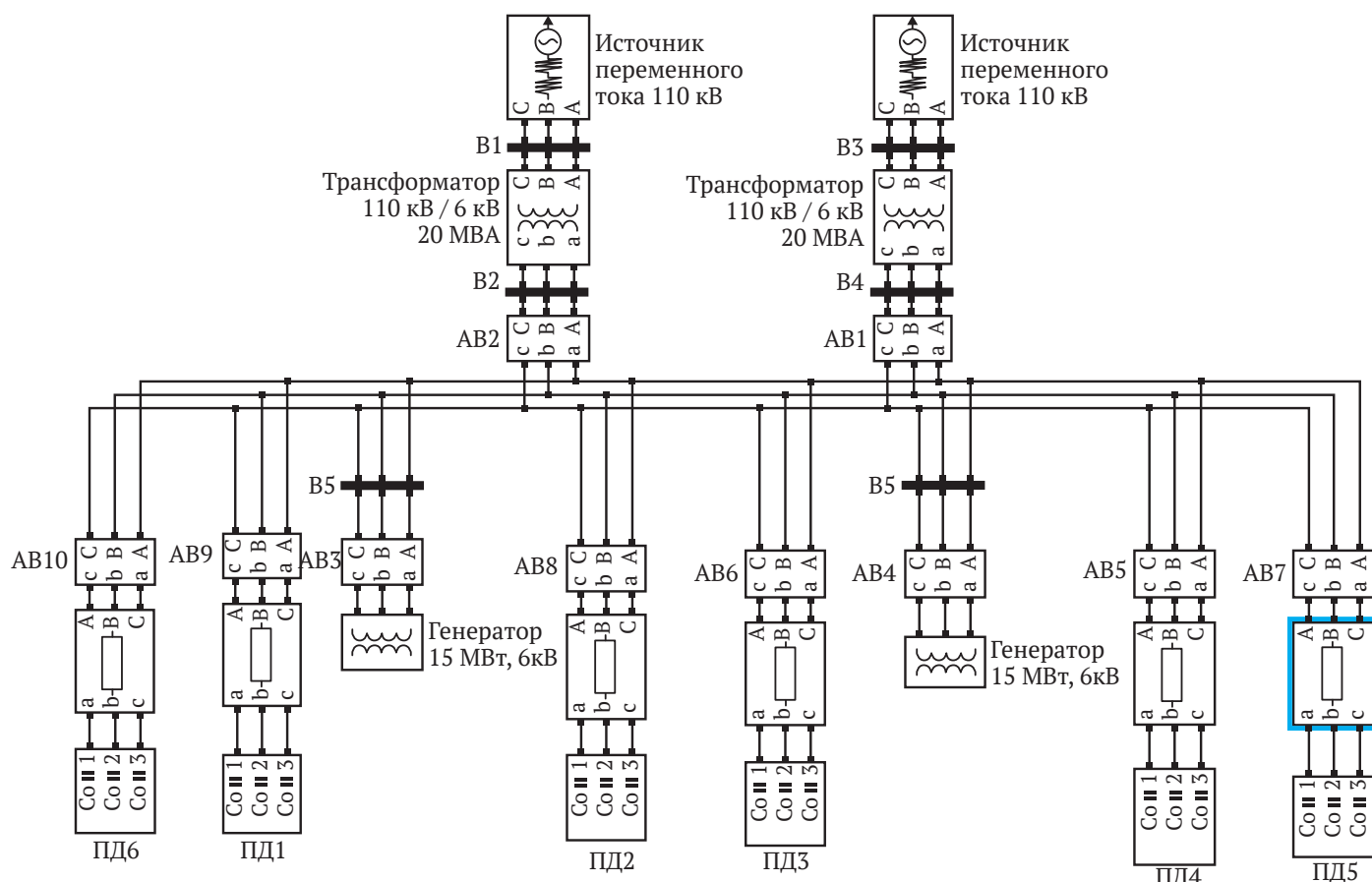


Рис. 2. Модель электрической системы глиноземного завода в Лам Донге

Fig. 2. Lam Dong alumina refinery electric power system model

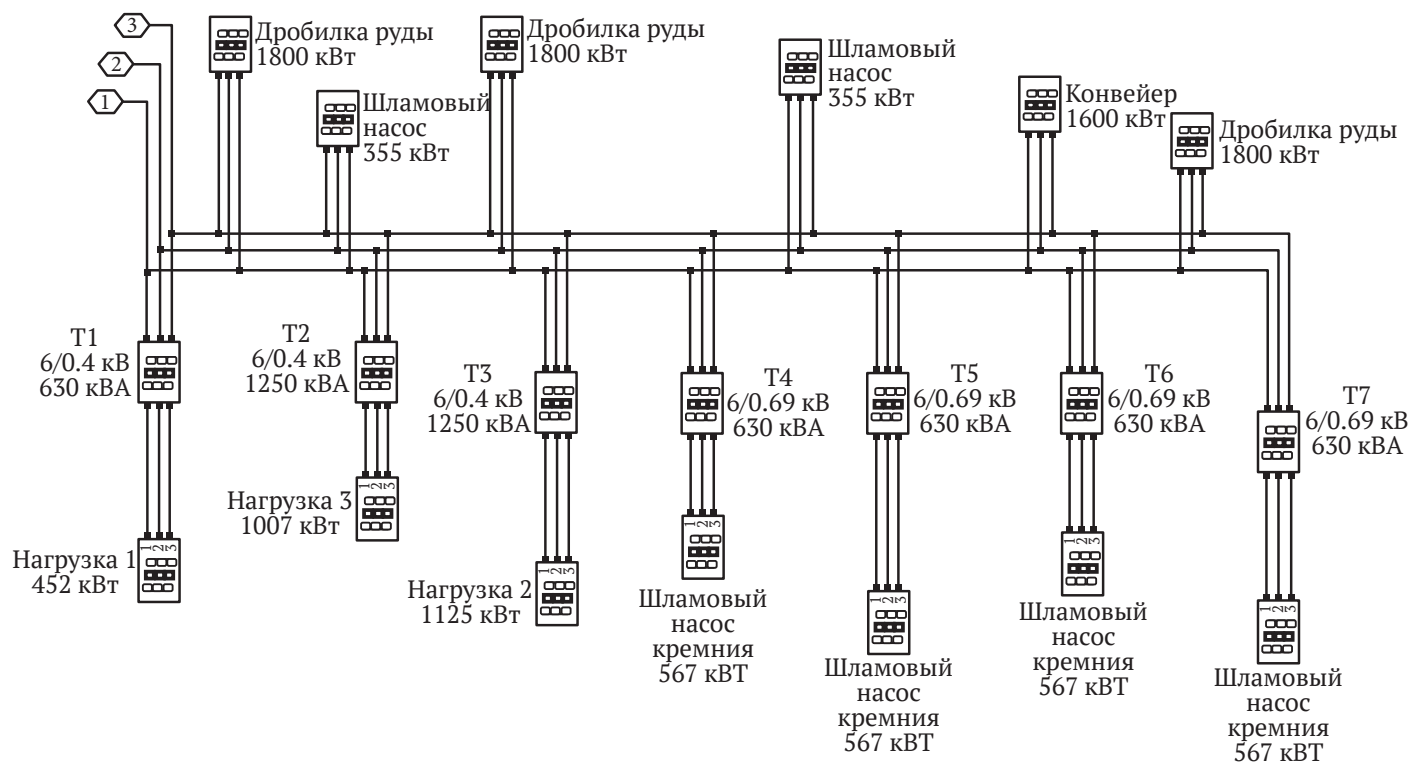


Рис. 3. Модель станции распределения электроэнергии ПД-1

Fig. 3. PD-1 power distribution station model

Результаты моделирования

В табл. 1 и 2 приведены коэффициенты нелинейных искажений (КНИ) по напряжению и току на шинах напряжением 6 кВ системы электроснабжения глиноземного завода и на шинах напряжением 6 и 0,4 кВ станций распределения электроэнергии ПД1...ПД6, полученные в результате моделирования процессов в системе электроснабжения глиноземного завода.

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты нелинейных искажений по напряжению и току на шинах напряжением 6 кВ
Harmonic distortion factors for voltage and current at buses of 6 kV voltage

Точки измерения КНИ	КНИ по напряжению, %	КНИ по току, %
Система электроснабжения глиноземного завода	0,02	1,66
ПД-1	0,02	2,12
ПД-2	0,02	2,07
ПД-3	0,20	0,78
ПД-4	0,02	2,20
ПД-5	0,02	3,35
ПД-6	0,02	3,86

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты нелинейных искажений по напряжению и току на шинах напряжением 0,4 кВ
Harmonic distortion factors for voltage and current at buses of 0.4 kV voltage

Точки измерения КНИ	КНИ по напряжению, %	КНИ по току, %
ПД-1	7,08	25,15
ПД-2	6,27	25,52
ПД-3	6,83	25,35
ПД-4	6,62	25,43
ПД-5	6,32	25,62
ПД-6	7,96	24,60

Анализ результатов показывает, что наличие нелинейных нагрузок приводит к значительным искажениям синусоидальных форм напряжений и токов на шинах напряжением 0,4 кВ по сравнению с шинами напряжением 6 кВ. Этот вывод подтверждается также сравнением форм графиков токов на стороне 6 кВ (рис. 4) и 0,4 кВ (рис. 5). Видно, что формы токов на стороне напряжения 0,4 кВ существенно отличаются от синусоидальных по сравнению с формой тока на стороне напряжения 6 кВ.

Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шинах низкого напряжения 0,4 кВ превышают допустимый предел по сравнению с международным стандартом IEEE ST519-1992 ($K_{NI_{U\%}} \leq 5$, $K_{NI_{I\%}} \leq 20$). Поэтому для компенсации высших гармоник тока и напряжения необходимо применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии [6–9].

Перспективным средством повышения качества электроэнергии является применение активных фильтров гармоник (АФГ). Работа АФГ основана на анализе гармоник тока нелинейной нагрузки и генерации в сеть гармоник тока с противоположной фазой. Как результат, высшие гармонические составляющие тока компенсируются в точке подключения АФГ и не распространяются от нелинейной нагрузки в сеть [10, 11].

Наличие нелинейной нагрузки приводит также к значительному снижению коэффициента мощности, что подтверждается результатами моделирования. Например, на подстанции 110/6 кВ коэффициент мощности находится в диапазоне от 0,62 до 0,46. Низкий коэффициент мощности подразумевает необходимость компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ и шинах низкого напряжения на распределительных станциях [12–14].

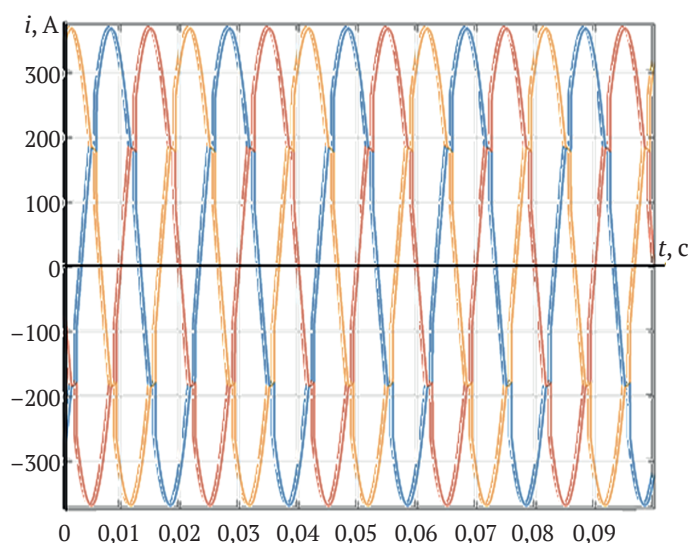


Рис. 4. Формы токов в трех фазах на стороне напряжения 6 кВ

Fig. 4. Three-phase current waveforms on 6 kV voltage side

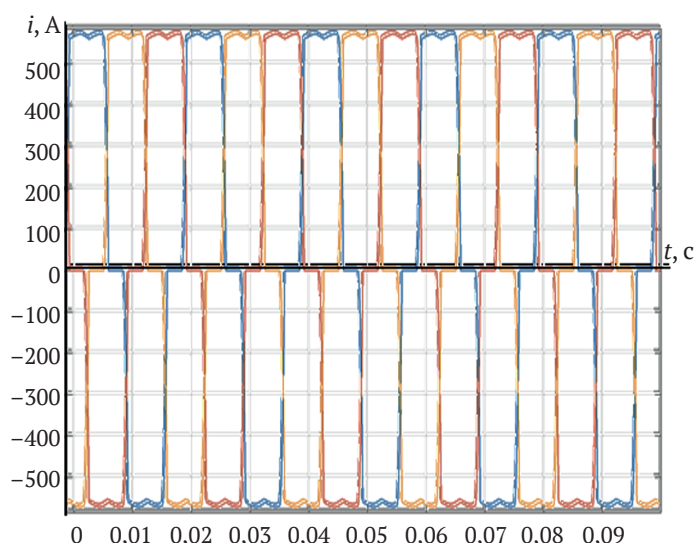


Рис. 5. Формы токов в трех фазах на стороне напряжения 0,4 кВ

Fig. 5. Three-phase current waveforms on 0.4 kV voltage side



Заключение

Разработанные модели для имитационного моделирования системы электроснабжения глиноземного завода Лам Донг при помощи пакета Matlab Simulink позволили провести исследования режимов работы системы и отдельных ее компонентов. Проанализированы результаты моделирования с целью выработки решений по улучшению качества электрической энергии.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. На шинах низкого напряжения – 0,4 кВ – под воздействием нелинейной нагрузки форма напряжения и тока существенно деформируется, что влияет на качество электроэнергии.

2. Коэффициенты нелинейных искажений напряжения и тока на шинах низкого напряжения – 0,4 кВ, и на шинах 6 кВ превышают допустимый международным стандартом IEEE ST519-1992 предел гармоник.

3. Для компенсации высших гармоник тока и напряжения необходимо применение в электрической системе глиноземного завода специальных регуляторов качества электроэнергии, например, активных фильтров гармоник.

4. На подстанции 110/6 кВ коэффициент мощности находится в диапазоне от 0,62 до 0,46. Низкий коэффициент мощности подразумевает необходимость компенсации реактивной мощности на шинах 6 кВ и шинах низкого напряжения на распределительных станциях.

Список литературы

1. Жежеленко И. В., Шидловский А. К., Пивняк Г. Г. и др. *Электромагнитная совместимость потребителей*. М.: Машиностроение; 2012. 351 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/48402076.pdf> (Дата обращения: 03.01.2021).

2. Железко Ю. С. *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии*. М.: Изд-во ЭНАС; 2009. 456 с.

3. Карташев И. И., Тульский В. И., Шамонов Р. Г. и др. *Управление качеством электроэнергии*. М.: Изд. дом МЭИ; 2006. 320 с.

4. Карандаев А. С., Корнилов Г. П., Храмшин Т. Р. и др. Анализ показателей качества электроэнергии в системе промышленного электроснабжения с мощными тиристорными электроприводами. *Вестник МГТУ*. 2006;(3):6–11. URL: <http://vestnik.mgtu.ru/content/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%9C%D0%93%D0%A2%D0%A3%20%D0%B7%D0%B0%202006%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4,%20%D0%9D%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%203.pdf>

5. Герман-Галкин С. Г. *Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink*. СПб.: Лань; 2013. 448 с.

6. Abramov B. I., Parfenov B. M., Shevryev Yu. V. Choice methods of the parameters of filter compensating stepped type devices for thyristor electric drives. *Электротехника*. 2001;(1):38–42.

7. Добрусин Л. А. *Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники*. М.: НТФ Энергопрогресс; 2003. 84 с.

8. Шевырева Н. Ю. Влияние на качество электроэнергии ступенчатого фильтро-компенсирующего устройства при работе буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015;(1):408415. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23005905>

9. Шевырев Ю. В. Повышение качества электрической энергии в сетях с полупроводниковыми преобразователями. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(4):234–241. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17265227>

10. Kanaan H. Y., Hayek A., Al-Haddad K., Rahmani S. Carrier-based linear decoupling control of a three-phase four-leg shunt active power filter. In: *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2007. P. 1839–1844. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4459970>

11. Сычев Ю. А. Анализ эффективности применения гибридных систем коррекции показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения предприятий минерально-сырьевого комплекса. В сб.: *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017*. 2017. С. 223–226.

12. Егоров А. Н., Семенов А. С., Харитонов Я. С., Федоров О. В. Анализ эффективности применения частотно-регулируемого электропривода в условиях алмазодобывающих предприятий. *Горный журнал*. 2019;(2):77–82. <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.16>

13. Ojo A., Awodele K., Sebitosi A. Load compensation in a three-phase four wire distribution system considering unbalance, neutral current elimination and power factor improvement. In: *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*. 2019. P. 389–394. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704821>

14. Сарваров А. С., Шевырев Ю. В., Федоров О. В. Оценка эффективности затрат на повышение энергетических показателей в сетях с полупроводниковыми преобразователями. *Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия «Энергетика»*. 2015;15(3):11–19. <https://doi.org/10.14529/power150302>



References

1. Zhezhenko I. V., Shidlovskiy A. K., Pivnyak G. G. et al. *Electromagnetic compatibility of consumers*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2012. 351 p. (In Russ.). URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/48402076.pdf> (Accessed: 03.01.2021).
2. Zhelezko Yu. S. *Electric power losses. Reactive power. Power quality*. Moscow: ENAS Publ. House; 2009. 456 p. (In Russ.).
3. Kartashev I. I., Tul'skiy V. I., Shamonov R. G. et al. *Electric energy quality management*. Moscow: MEI Publ.; 2006. 320 p. (In Russ.).
4. Karandaev A. S., Kornilov G. P., Khrumshin T. R. et al. Analysis of power quality indicators in an industrial power supply system with high-power thyristor drives. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. 2006;(3):6–11. (In Russ.). URL: <http://vestnik.magtu.ru/content/%D0%92%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%D0%9C%D0%93%D0%A2%D0%A3%20%D0%B7%D0%B0%202006%20%D0%B3%D0%BE%D0%B4,%20%D0%9D%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%80%203.pdf>
5. German-Galkin S. G. *Virtual laboratories for semiconductor systems in the Matlab-Simulink environment*. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2013. 488 p. (In Russ.).
6. Abramov B. I., Parfenov B. M., Shevyrev Yu. V. Choice methods of the parameters of filter compensating stepped type devices for thyristor electric drives. *Russian Electrical Engineering*. 2001;(1):38–42.
7. Dobrusin L. A. *Compensation filter devices for converter equipment*. Moscow: NTF Energoprogress Publ.; 2003. 84 p. (In Russ.).
8. Shevyreva N. Yu. The influence of multistage filter compensation device on energy quality during the operation of drill rigs with variable-frequency electric drive. *Mining informational and analytical bulletin*. 2015;(1):408–415. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23005905>
9. Shevyrev Yu. V. Improving electric power quality in networks with semiconductor converters. *Mining informational and analytical bulletin*. 2011;(4):234–241. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17265227>
10. Kanaan H. Y., Hayek A., Al-Haddad K., Rahmani S. Carrier-based linear decoupling control of a three-phase four-leg shunt active power filter. In: *IECON 2007 – 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2007, pp. 1839–1844. <https://doi.org/10.1109/IECON.2007.4459970>
11. Sychev Yu. A. Analysis of hybrid system effectiveness for correcting power quality indicators in power supply systems of mining and processing industry enterprises. In: *Innovations and prospects for the development of mining machinery and electrical machinery manufacturing: IPDME-2017*. 2017, pp. 223–226. (In Russ.).
12. Egorov A. N., Semenov A. S., Kharitonov Ya. S., Fedorov O. V. Efficiency of variable frequency drive in diamond mining. *Gornyi Zhurnal*. 2019;(2):77–82. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/gzh.2019.02.16>
13. Ojo A., Awodele K., Sebitosi A. Load compensation in a three-phase four wire distribution system considering unbalance, neutral current elimination and power factor improvement. In: *2019 Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*. 2019, pp. 389–394. <https://doi.org/10.1109/RoboMech.2019.8704821>
14. Sarvarov A. S., Shevyrev Yu. V., Fedorov O. V. Assessment of cost-effectiveness of improving energy performance in networks with semiconductor converters. *Bulletin of the South Ural State University. Series "Power Engineering"*. 2015;15(3):11–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.14529/power150302>

Информация об авторе

Тхань Лич До – преподаватель кафедры электрических систем, Профессионально-технический колледж, г. Далат, Вьетнам; e-mail: lichdalat@gmail.com

Information about the author

Thanh Lich Do – Lecturer at the Department of Electrical Systems, Dalat Vocational College, Da Lat, Vietnam; e-mail: lichdalat@gmail.com

Поступила в редакцию 14.03.2020

Поступила после рецензирования 29.04.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 14.03.2020

Revised 29.04.2021

Accepted 15.06.2021



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>**Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа**Р. С. Мележик✉, Д. А. Власенко^{SC}*Донбасский государственный технический институт, г. Алчевск, Украина*✉ ruslan.melezhik@gmail.com**Аннотация**

В процессе работы значительной части современного механического оборудования возникают динамические нагрузки, приводящие к выходу из строя деталей, узлов и механизмов, в связи с чем снижаются его долговечность и эксплуатационная надежность. Разработана методика расчета конструктивно-технологических параметров муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа с использованием метода планирования центрального композиционного ротatable униформ-планирования второго порядка и конечно-элементного метода расчета напряжений с применением системы автоматизированного проектирования. Обоснована аналитическая зависимость крутящего момента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) и ширины эластичного элемента с определенными физико-механическими свойствами, на основании которой получена формула суммарной ширины эластичного элемента дискового типа с учетом величины требуемого крутящего момента и определенного диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты). В целях проверки полученной зависимости номинального момента проведено дополнительное исследование муфт с определенным диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) при различной суммарной ширине эластичного элемента. В результате проведенных исследований определено влияние конструктивных показателей на передаваемый крутящий момент муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа. Предложен типоразмерный ряд муфт с определенными конструктивно-технологическими параметрами.

Ключевые слова

механическое оборудование; динамические нагрузки; муфтовое соединение, методика расчета, моделирование; метод конечных элементов

Для цитирования

Мележик Р. С., Власенко Д. А. Моделирование нагрузки и обоснование конструктивных параметров упругой пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):128–135. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type elementR. S. Melezhik✉, D. A. Vlasenko^{SC}*Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine*✉ ruslan.melezhik@gmail.com**Abstract**

In the process of operation of present-day mechanical equipment, dynamic loads arise, leading to the failure of parts, assemblies and mechanisms and, thus, reducing the equipment life time and operational reliability. A method has been developed for calculating the design and technological values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element, using the method of central compositional rotatable uniform planning of the second order and the finite-element method for calculating stresses using a computer-aided design system. The analytical dependence of the torque on the PCD (pin (centers of holes for pin) circle diameter) and the width of the flexible element with certain physical and mechanical properties was substantiated, on the basis of which the formula for the total width of the flexible disk-type element was obtained, taking into account the value of the required torque and the given PCD. In order to check the obtained dependence of the nominal



torque, an additional study of couplings with the given PCD was carried out at different total width of the flexible element. The implemented research allowed determining the influence of the design characteristic values on the transmitted torque of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. A standard-size range of couplings with certain design and technological values has been proposed.

Keywords

mechanical equipment; dynamic loads; coupling connection, calculation method, simulation; finite-element method

For citation

Melezhik R. S., Vlasenko D. A. Load simulation and substantiation of design values of a pin flexible coupling with a flexible disk-type element. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):128–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-128-135>

Введение

В процессе работы механического оборудования возникают динамические нагрузки, негативно влияющие на его эксплуатационные показатели [1]. Эти нагрузки зарождаются под действием неуравновешенных сил и моментов, возникающих при неустановившемся движении масс, а также в машинах с вращающимися частями и кривошипно-шатунными механизмами [2]. Динамические нагрузки приводят к выходу из строя деталей, узлов и механизмов, при этом снижаются долговечность и эксплуатационная надежность машины [1, 3]. Данные нагрузки возникают при работе значительной части современного оборудования, работа которого обеспечивает функционирование технологических процессов [4, 5]. Необходимо отметить, что от характера динамических нагрузок в значительной степени зависят такие показатели как производительность оборудования и качество выпускаемого с его помощью продукта [1, 6, 7].

Для фракционной подготовки различных материалов широкое распространение получили валковые дробилки [8–10]. В агломерационных цехах металлургических предприятий для измельчения твердого топлива зачастую используются четырехвалковые дробилки ДЧГ 900×700¹ [11]. Их достоинствами являются достаточно высокая однородность фракционного состава готового продукта, относительная простота конструкции и технического обслуживания. Однако одним из главных недостатков этих дробильных машин является быстрый выход из строя элементов привода из-за динамических нагрузок, возникающих при разрушении материала между рабочими поверхностями валков [12, 13]. Зубчатые муфты, зачастую применяемые в приводе такого типа дробилок, не обладают существенными демпфирующими свойствами и плохо переносят ударно-переменные нагрузки, вследствие чего имеют небольшой срок службы.

С учетом вышесказанного возникает необходимость в поиске решений, связанных с увеличением срока службы элементов привода и снижением негативного влияния динамических нагрузок на оборудование. Одним из таких решений является применение компенсирующих муфт различного типа.

Данные муфты способны не только компенсировать радиальные и угловые смещения, но и демпфировать ударные нагрузки, возникающие в процессе работы оборудования.

На сегодняшний день существует большое количество разновидностей муфт, однако для применения в валковых дробилках следует учитывать некоторые их эксплуатационные особенности. Так, торообразные муфты² имеют сравнительно большие демпфирующие свойства, но из-за значительных диаметральных размеров их применение в четырехвалковых дробилках невозможно без существенных изменений в конструкции привода и фундамента дробильной машины. Лепестковые муфты³ позволяют работать с большими вибрационными и ударными нагрузками, но возникающие при этом обрывы и ослабления креплений лепестков будут негативно сказываться на эксплуатационной надежности дробилки. Благодаря относительной простоте конструкции и удобству замены упругих элементов втулочно-пальцевые муфты⁴ стали бы альтернативой зубчатым муфтам, но упругие элементы относительно малой толщины не смогут в полной степени компенсировать ударные нагрузки, возникающие при дроблении. Муфты с упругой звездочкой⁵ редко применяются в дробильном оборудовании из-за относительно малых компенсирующих способностей. Применение цепных муфт⁶ в условиях агломерационного производства нецелесообразно, так как их отдельные элементы будут подвержены высокому износу из-за агрессивной среды.

В связи с вышеперечисленным предлагается использовать муфту пальцевую с эластичным элемен-

² Государственный стандарт СССР. ГОСТ 20884-82. Муфты упругие с торообразной оболочкой. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1985.

³ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 95.10000-83. Муфты упругие лепестковые. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1991.

⁴ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 21424-93. Муфты упругие втулочно-пальцевые. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1996.

⁵ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 14084-76. Муфты упругие со звездочкой. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1985.

⁶ Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 20742-93. Муфты цепные. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1996.

¹ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 18266-72. Дробилки валковые с рифлеными и гладкими валками. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 1974.

том дискового типа⁷, изготовленным из резинокордного материала, в котором кордные диски чередуются с резиновыми (рис. 1).

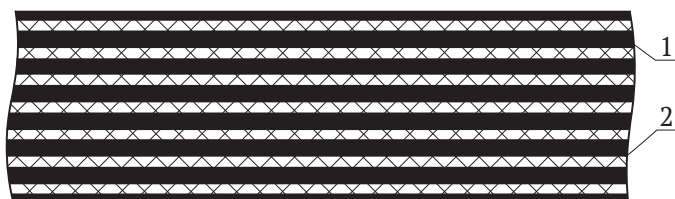


Рис. 1 Резинокордный материал:

1 – резина; 2 – кордная ткань

Fig. 1. Rubber-cord material:

1 – rubber; 2 – cord fabric

Достоинством данной муфты является передача сравнительно больших крутящих моментов с возможностью эффективно компенсировать значительные ударные нагрузки, возникающие в результате работы дробилки. Демпфирующие свойства данной муфты выше, чем у зубчатой, втулочно-пальцевой или муфты с упругой звездочкой. При этом значение передаваемого крутящего момента на порядок больше, чем у торообразных, лепестковых и цепных муфт.

В настоящее время типоразмер муфты определяется на основании производственного опыта эксплуатации оборудования методом проб и ошибок, так как не существует разработанной методики, позволяющей рассчитывать конструктивно-технологические параметры исходя из заданной величины передаваемого крутящего момента. Это обстоятельство ограничивает возможность применения данного типа муфт, так как процедура внедрения предлагаемой муфты в каждое новое оборудование займет значительное время для наработки информации, необходимой для нахождения подходящих конструктивно-технологических параметров, а также будет связана с неизбежным возникновением аварийных ситуаций и увеличением времени простоев на техническое обслуживание.

Задачи исследований

Задачами данного исследования являются разработка методики расчета муфты пальцевой с эластичным элементом дискового типа на основании многофакторного исследования с использованием метода конечных элементов, а также обоснование типоразмерного ряда муфт с предлагаемыми конструктивно-технологическими параметрами.

Методология исследований

Математический аппарат для аналитического расчета эластичных муфт в достаточной мере сложный. Фаски и скругления, шпоночные пазы, отверстия под пальцы, посадочные места под валы, применение различных материалов для полумуфт и упругих элементов, а также возникающие контактные напряже-

ния и сложная взаимосвязь элементов муфты – значительно усугубляют и без того затруднительные расчеты.

В связи с этим для моделирования условий нагружения и обоснования конструктивно-технологических параметров пальцевой муфты с эластичным элементом дискового типа в данной работе использовался конечно-элементный метод расчета напряжений с применением программного комплекса SolidWorks [14–16].

Для обоснования аналитической зависимости было использовано двухфакторное исследование, позволяющее определить влияние каждого фактора в изменяющихся условиях на основании метода конечных элементов и спрогнозировать поведение модели в реальной среде путем виртуального испытания.

Исследования нагружения муфты основывались на методе с использованием центрального композиционного ротatableльного униформпланирования второго порядка [17]. При проведении испытаний, необходимых для определения численных значений коэффициентов регрессии, в качестве основных независимых факторов, определяющих основные конструктивные параметры муфты, выбирались (табл. 1):

- диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты) D ;
- суммарная ширина эластичного элемента дискового типа B .

Таблица 1 / Table 1

Интервалы варьирования факторов для модели муфты

Intervals of variation of factors for the coupling model

Уровни и интервалы варьирования факторов	$x_1 (D)$, м	$x_2 (B)$, м
Основной уровень, $x_i = 0$	0,395	0,056
Интервал варьирования, I	0,110	0,020
Верхний уровень, $x_i = +1$	0,505	0,076
Нижний уровень, $x_i = -1$	0,285	0,036
Верхняя звездная точка, $x_i = +1,414$	0,550	0,084
Нижняя звездная точка, $x_i = -1,414$	0,240	0,028

Для проведения испытаний ряда муфт использовались следующие конструктивно-технологические параметры эластичных элементов дискового типа (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Конструктивные параметры эластичного элемента муфт

Design values of the coupling flexible element

Наружный диаметр упругого элемента, м	D_o	0,320	0,365	0,506	0,647	0,700
Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	D	0,240	0,285	0,395	0,505	0,550
Диаметр отверстий под пальцы, м	d	0,037	0,042	0,058	0,075	0,081
Количество отверстий под пальцы, шт.	n	6	6	8	8	8

⁷ Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ 26455-97. Муфты дисковые полужесткие. Официальное издание. М.: Издательство стандартов; 2001.

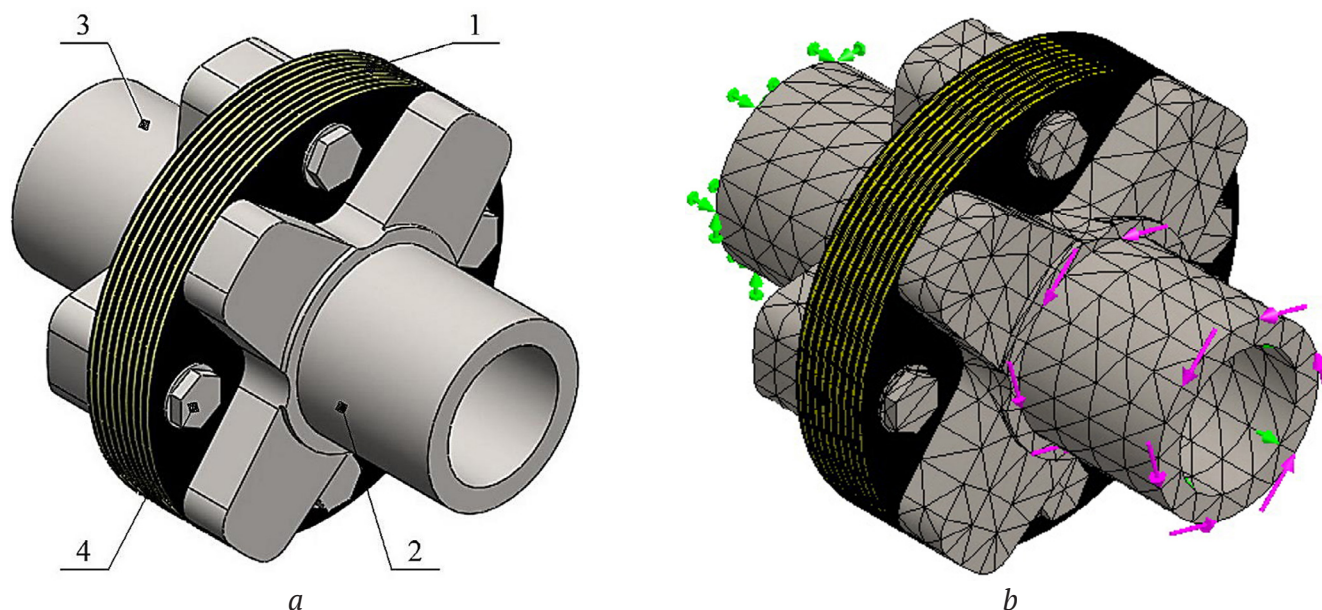


Рис. 2 Модель исследуемой муфты:

1 – эластичный элемент; 2, 3 – полумуфта; 4 – пальцы;

а – 3D-модель муфты; б – 3D-модель муфты с наложенной сеткой и крутящим моментом

Fig. 2. Model of the investigated coupling:

1 – flexible element; 2, 3 – half-coupling; 4 – pins;

а – 3D coupling model; б – 3D-model of the coupling with superimposed “network” and torque

Эластичный элемент состоит из нескольких чередующихся резиновых обкладных дисков толщиной 3,5 мм и кордотканевых дисков толщиной 7 мм со следующими физико-механическими характеристиками⁸:

- кордная ткань: модуль упругости $2 \cdot 10^9$ Па; коэффициент Пуассона 0,1; модуль сдвига $285 \cdot 10^6$ Па; предел прочности на растяжение $200 \cdot 10^6$ Па;

- резина: модуль упругости $5 \cdot 10^6$ Па; коэффициент Пуассона 0,5; модуль сдвига $0,6 \cdot 10^6$ Па; предел прочности на растяжение $25 \cdot 10^6$ Па.

В процессе моделирования в зависимости от типоразмера муфты нагружались крутящим моментом в пределах 4...107 кНм. При этом в процессе анализа полученных результатов возникающие в телах полумуфт и пальцев напряжения не принимались во внимание, поскольку они не являются целью данного исследования, так как демпфирование осуществляется непосредственно эластичным элементом.

На первом этапе создавались твердотельные модели муфт (рис. 2, а) типоразмерного ряда с шириной и диаметром упругих элементов согласно матрице планирования (см. табл. 1). Затем было выполнено разделение модели на дискретные связанные между собой элементы (наложение «сетки») с осуществлением креплений и приложением крутящего момента (рис. 2, б).

При моделировании нагружения одна из полумуфт жестко закреплена, второй задана одна степень свободы – возможность вращения вокруг своей оси симметрии. Для моделирования было выбрано нели-

нейное статическое исследование с учетом параметра большой деформации и использования совместной сетки с типом контакта «связанные».

Максимальный крутящий момент, прикладываемый к муфте с возможностью вращения вокруг своей оси, определялся из условия, при котором средняя величина напряжений, возникающих в эластичном элементе (рис. 3), не превышала значений, при которых происходит разрушение кордовой ткани с учетом заложенного коэффициента запаса прочности ($k_3 = 5$).

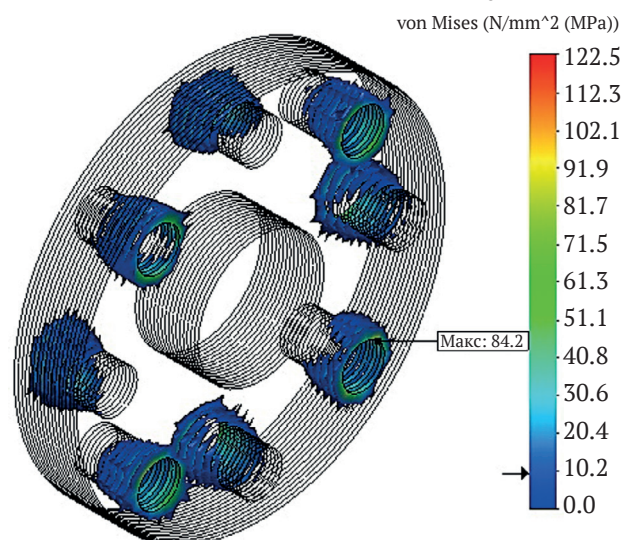


Рис. 3. Эпюра эквивалентных напряжений эластичного элемента с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфт) 0,550 м
Fig. 3. Diagram of equivalent stresses of the flexible element with the PCD of 0.550 m

⁸ Государственный стандарт СССР. ГОСТ 20-85. Ленты конвейерные резиноканевые. М.: Издательство стандартов; 1985.

На следующем этапе выполнялось определение крутящего момента, отвечающего вышеописанным требованиям, для муфты с минимально допустимой шириной эластичного элемента. В дальнейшем при моделировании ширина эластичного элемента поэтапно увеличивалась и крутящий момент определялся снова. В результате были получены зависимости значений напряжений, возникающих на каждом из упругих элементов в зоне контакта с пальцами муфт с различной шириной эластичного элемента, для каждого типоразмера муфт (см. табл. 2).

Результаты исследований

Из анализа полученных данных были определены значения максимальных крутящих моментов, передаваемых муфтой определенного типоразмера (табл. 3), согласно плану центрального композиционного ротатбельного униформ-планирования второго порядка.

Таблица 3 / Table 3

Передаваемый крутящий момент
Transmitted torque

Параметр	Значение максимального крутящего момента								
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9-13
Момент, кНм	11	54	9	87	7	103	34	40	39

В ходе обработки данных получены коэффициенты регрессии, при этом значения критерия Стьюдента указывают на то, что все эти коэффициенты являются значимыми.

Полученная в кодовом виде зависимость функции откликов для определения передаваемого крутящего момента имеет вид:

$$M = 3,222 \cdot 10^4 \cdot x_1 + 4,815 \cdot 10^3 \cdot x_2 + 6,435 \cdot 10^3 \cdot x_1^2 + 2,6 \cdot 10^3 \cdot x_2^2 + 8,743 \cdot 10^3 \cdot x_1 \cdot x_2 + 3,901 \cdot 10^4. \quad (1)$$

В натуральном виде зависимость функций откликов для определения передаваемого крутящего момента выглядит следующим образом:

$$M = 4,029 \cdot 10^6 \cdot B \cdot D - 6,6327 \cdot 10^6 \cdot B^2 - 6,0542 \cdot 10^5 \cdot B + 5,3569 \cdot 10^5 \cdot D^2 - 3,5485 \cdot 10^5 \cdot D + 6,1175 \cdot 10^4. \quad (2)$$

На основании анализа результатов исследований влияния ширины на несущую способность муфты получены графики зависимостей максимально допустимого крутящего момента от ширины пакета эластичных элементов (рис. 4).

Из графиков (см. рис. 4) видно, что величина максимально допустимого крутящего момента возрастает с увеличением ширины эластичного элемента до определенного значения, а затем наблюдается спад, возникающий вследствие использования пальцев большей длины, которые существенно повышают деформацию упругих элементов в зоне контакта, тем самым резко увеличивая напряжения в телах упругих элементов.

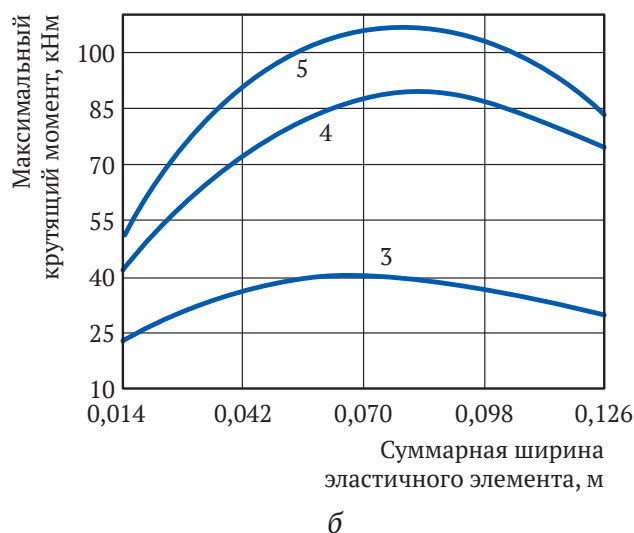
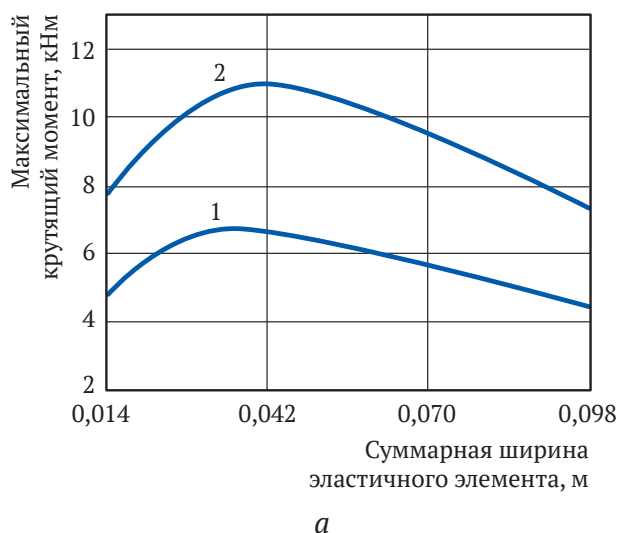


Рис. 4. Графики зависимостей максимального крутящего момента от ширины эластичного элемента муфты: 1 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,240 м; 2 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,285 м; 3 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,395 м; 4 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,505 м; 5 – с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,550 м; а – муфты с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,240, 0,285 м; б – муфты с диаметром окружности расположения центров пальцев (муфты) 0,395, 0,505, 0,550 м

Fig. 4. Graph of the maximum torque as a function of the coupling flexible element width: 1 – with the PCD of 0.240 m; 2 – with the PCD of 0.285 m; 3 – with the PCD of 0.395 m; 4 – with the PCD of 0.505 m; 5 – with the PCD of 0.550 m

а – couplings with the PCD values of 0.240, 0.285 m; б – couplings with the PCD values of 0.395, 0.505, 0.550 m



На основании формулы (2) получена зависимость суммарной ширины эластичного элемента дискового типа для передачи требуемого крутящего момента от определенного диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты):

$$B = 0,3039 \cdot D - 0,0456 - 7,5415 \cdot 10^{-8} \times \quad (3)$$

$$\times \sqrt{3,0456 \cdot 10^{13} \cdot D^2 - 1,4291 \cdot 10^{13} \cdot D - 2,652 \cdot 10^7 \cdot M + 1,989 \cdot 10^{12}}.$$

На основании формулы (3) получен график зависимости суммарной ширины эластичного элемента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) при заданной величине крутящего момента (рис. 5).

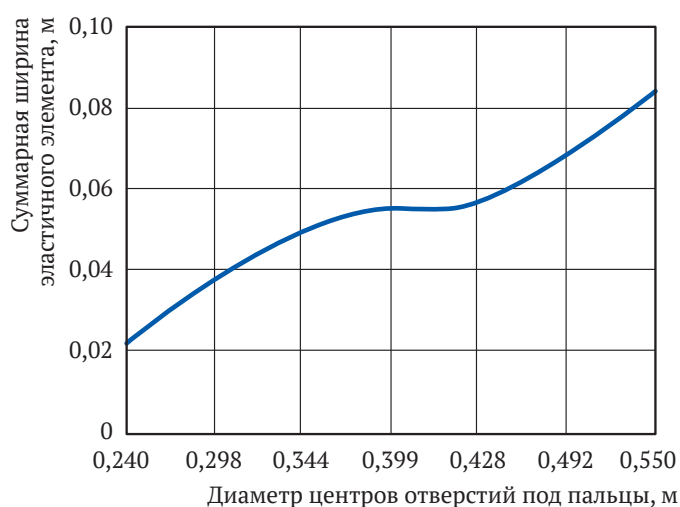


Рис. 5. График зависимости суммарной ширины эластичного элемента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) при заданной величине крутящего момента

Fig. 5. Graph of the flexible element total width as a function of the PCD at a given torque

С учетом результатов исследований предложен типоразмерный ряд муфт упругих пальцевых с эластичным элементом дискового типа с основными конструктивно-технологическими параметрами, представленными в табл. 4.

В условиях агломерационного цеха Филиала №12 ЗАО «Внешторгсервис» основным материалом, служащим для изготовления эластичного элемента, является резинотканевая транспортная лента, состоящая из двух резиновых обкладных толщиной 3,5 мм и кордотканевых слоев толщиной 7 мм (общая ширина – 14 мм), вследствие чего ширина эластичного элемента должна быть кратной 14. Конструктивные параметры муфты, с учетом вышесказанного, приведены в табл. 5.

Заключение

На основании центрального композиционного ротатбельного униформпланирования второго порядка и конечно-элементного метода расчета напряжений с применением системы автоматизированного проектирования разработана методика расчета конструктивно-технологических параметров муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа.

Получены зависимости крутящего момента от диаметра окружности расположения центров пальцев (муфты) и ширины эластичного элемента, суммарной ширины эластичного элемента дискового типа от величины требуемого крутящего момента при определенном диаметре окружности расположения центров пальцев (муфты).

В результате выявлено влияние конструктивных показателей на передаваемый крутящий момент муфты данного типа. Предложен типоразмерный ряд муфт с основными конструктивно-технологическими параметрами.

Таблица 4 / Table 4

Конструктивно-технологические параметры муфты упругой пальцевой с эластичным элементом дискового типа

Design and technological values of the pin flexible coupling with the flexible disk-type element

Наружный диаметр упругого элемента, м	D_o	0,320	0,380	0,440	0,500	0,560	0,630	0,700
Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	D	0,240	0,298	0,344	0,392	0,438	0,492	0,550
Диаметр отверстий под пальцы, м	d	0,037	0,044	0,051	0,058	0,065	0,073	0,081
Количество отверстий под пальцы, шт.	n	6	6	6	8	8	8	8
Ширина эластичного элемента*, м	B	0,022	0,037	0,050	0,055	0,057	0,069	0,085
Номинальный крутящий момент, кНм	M	12	16	25	38	53	80	117

* При использовании в качестве эластичного элемента резинотканевой транспортной ленты принимаем ближайшее большее значение, кратное ее толщине (при равной толщине корда и резиновых обкладок).

Таблица 5 / Table 5

Конструктивные параметры муфты

Coupling design values

Диаметр окружности расположения центров пальцев (муфты), м	D	0,240	0,298	0,344	0,392	0,438	0,492	0,550
Ширина эластичного элемента*, м	B	0,028	0,042	0,056	0,056	0,070	0,070	0,084



В дальнейшем представленная методика позволит обосновать широкий ряд типоразмеров муфт упругих пальцевых с эластичным элементом дискового типа для конкретного оборудования при заданных условиях работы. Муфты данного типа повысят срок службы деталей, узлов и механизмов оборудования путем ком-

пенсирования значительных ударных нагрузок, возникающих в процессе работы, а возможность передачи относительно больших крутящих моментов позволит найти широкое применение во всех отраслях промышленности, в частности, для оборудования, работа которого сопряжена с возникновением ударных нагрузок.

Список литературы

1. Ruina A., Pratap R. *Introduction to Statics and Dynamics*. Oxford University Press; 2011.
2. Gray G. L., Costanzo F., Plesha M. E. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. McGraw-Hill; 2010.
3. Beer F. P. Jr., et al. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. 10th ed. McGraw-Hill; 2013.
4. Beer F. P., Johnston E. R., DeWolf J. T., Mazurek D. F. *Mechanics of Materials*. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
5. Gupta A., Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science; 2006.
6. Shoemaker Robert S. *The Circulating Load: Practical Mineral Processing Plant Design by an Old-Time Ore Dresser*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2002. URL: <https://ru.scribd.com/document/357524740/Robert-S-Shoemaker-the-Circulating-Load-Practical-Mineral-Processing-Plant-Design-by-an-Old-time-Ore-Dresser>
7. Napier-Munn T. J., Morrel S., Morrison R. D., Kojovic T. *Mineral Comminution Circuits Their operation and optimization*. 3rd ed. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland; 2005.
8. Wills B. A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th ed. Elsevier Science & Technology Books; 2006.
9. Dave Osborne (ed.) *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Vol. 1. Woodhead Publishing Series in Energy; 2013.
10. Клебанов О. В., Шубов Л. Я., Щеглова Н. К. *Справочник технолога по обогащению руд цветных металлов*. М.: Недра; 1974.
11. Власенко Д. А. Технические решения в области проектирования и повышения эффективности дробильно-измельчительных машин. *Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. Том 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*. 2020:88–91. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43168282>
12. Власенко Д. А. Математическое моделирование процесса захвата материала рифлеными валками в валковых дробилках. *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. 2020;(18):122–130. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42669083>
13. Мележик Р. С., Власенко Д. А. Исследование динамики валковой дробилки в процессе дробления материала. *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. 2020;(21):94–100. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44817768>
14. Planchard D. C. *Official certified SolidWorks professional (CSWP) Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012-2014*. SDC Publications; 2014.
15. Lombard Matt. *SolidWorks 2011 Parts Bible* Wiley; 2011.
16. Jankowski G., Doyle R. *SolidWorks for Dummies*. Wiley Publishing, Inc.; 2011.
17. Блохин В. Г., Глудкин О. П., Гуров А. И., Ханин М. А. *Современный эксперимент: подготовка, проведение, анализ результатов*. М.: Радио и связь; 1997.

References

1. Ruina A., Pratap R. *Introduction to Statics and Dynamics*. Oxford University Press; 2011.
2. Gray G. L., Costanzo F., Plesha M. E. *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics*. McGraw-Hill; 2010.
3. Beer F. P. Jr., et al. *Vector Mechanics for Engineers: Statics and Dynamics*. 10th ed. McGraw-Hill; 2013.
4. Beer F. P., Johnston E. R., DeWolf J. T., Mazurek D. F. *Mechanics of Materials*. 7th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2015.
5. Gupta A., Yan D. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Elsevier Science; 2006.
6. Shoemaker Robert S. *The Circulating Load: Practical Mineral Processing Plant Design by an Old-Time Ore Dresser*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2002. URL: <https://ru.scribd.com/document/357524740/Robert-S-Shoemaker-the-Circulating-Load-Practical-Mineral-Processing-Plant-Design-by-an-Old-time-Ore-Dresser>
7. Napier-Munn T. J., Morrel S., Morrison R. D., Kojovic T. *Mineral Comminution Circuits Their operation and optimization*. 3rd e. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, University of Queensland; 2005.
8. Wills B. A., Napier-Munn T. *Wills' Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th ed. Elsevier Science & Technology Books; 2006.



9. Dave Osborne (ed.) *The Coal Handbook: Towards Cleaner Production*. Vol. 1. Woodhead Publishing Series in Energy; 2013.

10. Klebanov O. V., Shubov L. Ya., Shcheglova N. K. Technologist's handbook for beneficiation of nonferrous metal ores. Moscow: Nedra Publ.; 1974. (In Russ.).

11. Vlasenko D. A. Technical solutions in the field of designing and improving efficiency of crushing and grinding facilities. In: *Proceedings of the 6th International Research-to-Practice Conference*. Vol. 3. *Innovative technologies for designing, manufacture and operation of industrial machines and plant units*. 2020:88–91. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43168282>

12. Vlasenko D. A. Mathematical modeling of the process of material capture by fluted rolls of a roll crusher. In: *Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical University*. 2020;(18):122–130. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42669083>

13. Melezhik R. S., Vlasenko D. A. Study of roll crusher dynamics during material crushing. In: *Collection of Scientific Papers of Donbass State Technical University*. 2020;(21):94–100. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44817768>

14. Planchard D. C. *Official certified SolidWorks professional (CSWP) Certification Guide with Video Instruction: SolidWorks 2012-2014*. SDC Publications; 2014.

15. Lombard Matt. *SolidWorks 2011 Parts Bible* Wiley; 2011.

16. Jankowski G., Doyle R. *SolidWorks for Dummies*. Wiley Publishing, Inc.; 2011.

17. Blokhin V. G., Gludkin O. P., Gurov A. I., Khanin M. A. *Present-day experiment: preparation, conduct, analysis of results*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ.; 1997. (In Russ.).

Информация об авторах

Руслан Сергеевич Мележик – аспирант, кафедра металлургии черных металлов, факультет металлургического и машиностроительного производства, Донбасский государственный технический институт, Алчевск, Украина, e-mail: ruslan.melezhik@gmail.com

Дмитрий Алексеевич Власенко – к.т.н., доцент, кафедра металлургии черных металлов, факультет металлургического и машиностроительного производства, Донбасский государственный технический институт, Алчевск, Украина, Scopus ID: [57211713792](https://orcid.org/0000-0002-5721-1713); e-mail: vlasdmitrij@yandex.ru

Information about the authors

Ruslan S. Melezhik – PhD student, Metallurgy of Ferrous Metals Department, Faculty of Metallurgical and Engineering Production, Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine, e-mail: ruslan.melezhik@gmail.com

Dmitry A. Vlasenko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Metallurgy of Ferrous Metals Department, Faculty of Metallurgical and Engineering Production, Donbas State Technical University, Alchevsk, Ukraine; Scopus ID: [57211713792](https://orcid.org/0000-0002-5721-1713); e-mail: vlasdmitrij@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.04.2021

Поступила после рецензирования 23.05.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 14.04.2021

Revised 23.05.2021

Accepted 15.06.2021



ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>**Обоснование технико-экономических показателей
шахтных монорельсовых локомотивов**К. А. Рябко¹✉, В. О. Гутаревич²  ¹ Донецкий институт железнодорожного транспорта, г. Донецк, Украина² Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина✉ railroader@yandex.ru**Аннотация**

Шахтный транспорт является неотъемлемой частью технологического процесса добычи полезных ископаемых. Выполненный анализ современных монорельсовых автономных локомотивов свидетельствует о том, что данный вид подземного вспомогательного транспорта является наиболее перспективным на сегодняшний день ввиду ряда преимуществ, которые определены в данной работе. С целью оценки технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов в настоящее время применяется ряд характеристик – зависимостей нескольких параметров работы силовой установки друг от друга. Вид характеристики определяется по независимой переменной, в качестве которой выбирается один из эксплуатационных или конструктивных параметров. С целью обоснования технико-экономических показателей автономных шахтных подвесных монорельсовых локомотивов в статье предложена взаимосвязь характеристик оборудования тяговой энергетической цепи с коэффициентом полезного действия силовой установки дизелевоза. Для оценки эффективности эксплуатации шахтных монорельсовых подвесных локомотивов предложен комплексный показатель оценки эффективности различных видов тяги – эксплуатационный коэффициент полезного действия. Данный показатель учитывает изменение коэффициента полезного действия агрегатов энергетической цепи в зависимости от их режимов работы. При установлении функциональных зависимостей изменения коэффициента полезного действия силовых и вспомогательных агрегатов монорельсовых локомотивов предложена группировка основных параметров по признакам, зависящим от экономических характеристик силовой установки и режимов ее работы. Эксплуатационный коэффициент полезного действия локомотива в целом определяется как экономическими характеристиками всех агрегатов его энергетической цепи, так и режимами их работы.

Ключевые слова

выработка, монорельсовая дорога, подвесной дизелевоз, подвесной аккумуляторный локомотив, тяговая передача, электрический привод, технико-экономические показатели, коэффициент полезного действия, режимы работы

Для цитирования

Рябко К. А., Гутаревич В. О. Обоснование технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):136–143. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

Research article

**Substantiation of performance indicators
of mine monorail locomotives**K. A. Ryabko¹✉, V. O. Gutarevich²  ¹ Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk, Ukraine² Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine✉ railroader@yandex.ru**Abstract**

Mine transport is an integral part of mining process. The performed analysis of modern monorail autonomous locomotives indicates that this type of underground auxiliary transport is the most promising today due to a number of advantages that were identified in this study. To assess performance indicators of mine monorail locomotives, a number of characteristics are currently used, for instance, the dependences between several



parameters of propulsion system operation. The type of characteristic is determined by an independent variable to be selected from the list of the operational or design parameters. To substantiate performance indicators of autonomous mine suspended monorail locomotives, the authors proposed the relationship between the characteristics of the traction energy chain equipment and the diesel locomotive propulsion system efficiency factor. To assess the efficiency of mine suspended monorail locomotive operation, a composite indicator for assessing efficiency of various types of traction was proposed: the operational efficiency factor. This indicator takes into account varying the efficiency factor of the energy chain units depending on their operating modes. When determining the functional dependencies of varying the efficiency factor of power and auxiliary units of monorail locomotives, a grouping of the main parameters according to the features depending on the economic characteristics of the propulsion system and its operating modes was proposed. The operational efficiency factor of the locomotive as a whole is determined both by the economic characteristics of all units of its energy chain and by the modes of their operation.

Keywords

output, monorail, suspended diesel locomotive, suspended storage-battery locomotive, tractive transmission, electric drive, performance indicators, efficiency factor, operating modes

For citation

Ryabko K. A., Gutarevich V. O. Substantiation of performance indicators of mine monorail locomotives. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):136–143. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-136-143>

Введение

Шахтный транспорт является неотъемлемой частью технологического процесса добычи полезных ископаемых. Основным видом транспорта для перемещения вспомогательных грузов и людей в пределах горного предприятия является внутренний подземный транспорт. В горизонтальных выработках преобладает локомотивная тяга, а в наклонных – канатная, что неизбежно связано с маневровыми операциями и применением многоступенчатой технологии перемещения. На шахтах, имеющих разветвленные и искривленные выработки со знакопеременным профилем, работа вспомогательного подземного транспорта особенно усложняется. Несмотря на сравнительно малый объем перевозок – до 10% от основной погрузки, доставка вспомогательных грузов и людей на сегодняшний день остается достаточно трудоемким процессом. Опыт эксплуатации подвешенного монорельсового транспорта свидетельствует о тенденциях перехода к бесперегрузочной технологии транспортирования с использованием подвешенных монорельсовых дорог, позволяющих перевозить в пределах шахтного поля крупногабаритные грузы массой до 32 т [1–3].

Монорельсовые транспортные системы по сравнению с остальными средствами вспомогательного подземного транспорта обладают рядом преимуществ:

- возможность перевозки грузов в подвешенном состоянии, что в первую очередь приводит к снижению порожней массы состава и в некоторых случаях исключает применение нетяговых подвижных единиц;
- работа при малых радиусах кривых и знакопеременных профилях пути до $\pm 30^\circ$ в отличие от напочвенных локомотивов;
- возможность демонтажа и продления монорельса при разработке новых выработок;
- сокращение количеств транспортных инцидентов, связанных со сходом подвижного состава с рельс;
- уменьшение обводненности и загрязнения пути;

– более рациональное использование пространства выработки за счет совмещения технологических процессов транспортирования вспомогательных грузов и полезного ископаемого.

Тяговыми средствами монорельсовой транспортной системы являются автономные тяговые модули, входящие в состав монорельсового локомотива. Различают два вида тяги монорельсовых локомотивов: дизельная – с применением малотоксичных дизельных двигателей, и электрическая.

Вне зависимости от типа силового агрегата все подвешенные монорельсовые локомотивы имеют блочную конструкцию, состоящую из двух кабин управления, тяговых устройств, силового или аккумуляторного модуля, вспомогательных модулей и грузовых тележек или пассажирских вагонеток.

Цель и задачи исследования

Целью данного исследования является разработка универсальной методики обоснования технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов с учетом их режимов работы.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи:

- выполнить анализ современных монорельсовых локомотивов, определить их преимущества и перспективы применения на горнодобывающих предприятиях;
- выполнить обзор научных исследований, посвященных обоснованию технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов;
- используя методы математического анализа, основанные на дифференциальном исчислении, разработать зависимости изменения КПД агрегатов энергетической цепи дизелевоза, а также получить универсальное уравнение для определения эксплуатационного КПД шахтных монорельсовых локомотивов;
- на основании полученных уравнений определить эксплуатационный КПД дизелевоза для опытной поездки.

Анализ современных монорельсовых автономных локомотивов

С целью определения оптимальных технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов, рассмотрим более подробно различные виды тяги.

Монорельсовый шахтный подвесной дизельный локомотив типа DLZ210F (рис. 1) является автономным тяговым подвижным составом, предназначенным для транспортировки вспомогательных грузов или людей в горных выработках и на поверхности, в горизонтальной плоскости и при знакопеременном профиле монорельсового пути до $\pm 30^\circ$.

Шахтный подвесной монорельсовый локомотив DLZ210F в качестве силового агрегата имеет 4-тактный дизельный двигатель мощностью 142 кВт. Коли-

чество приводных единиц 4...12, максимальная скорость 2 м/с, максимальное тяговое усилие 330 кН [4].

Монорельсовый шахтный подвесной аккумуляторный локомотив типа DLZA90F (рис. 2) является автономным тяговым средством, предназначенным для перевозки вспомогательных грузов или людей в горных выработках и на поверхности, в горизонтальной плоскости и при знакопеременном профиле монорельсового пути до $\pm 30^\circ$.

Данный локомотив имеет тяговый электрический привод, получающий питание от аккумуляторной батареи. Электрическая мощность двигателей: $8 \cdot 7,5$ кВт. Количество приводных единиц: 4 (на одной единице размещено по 2 тяговых электрических двигателя). Максимальная скорость 2 м/с. Максимальное тяговое усилие 120 кН [5].



Рис. 1. Подвесной монорельсовый дизельный локомотив Ferrit DLZ210F [4]

Fig. 1. Ferrit DLZ210F suspended monorail diesel locomotive [4]



Рис. 2. Подвесной монорельсовый аккумуляторный локомотив Ferrit DLZA90F [5]

Fig. 2. Ferrit DLZA90F suspended monorail storage-battery locomotive [5]



Выполненный анализ современных монорельсовых автономных локомотивов свидетельствует о том, что данный вид подземного вспомогательного транспорта является наиболее перспективным на сегодняшний день ввиду ряда преимуществ, таких как:

- практически неограниченное расстояние перевозки вспомогательных грузов в пределах монорельсового пути предприятия;
- возможность работы в разветвленных выработках со знакопеременным профилем монорельсовой дороги до $\pm 30^\circ$;
- универсальность и маневренность;
- повышение безопасности работ.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод об актуальности задачи определения оптимальных технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов.

Созданию и совершенствованию монорельсовых транспортных средств для угольной промышленности способствовали работы ряда научно-исследовательских организаций и предприятий, в числе которых следует отметить Гипроуглегормаш, Донгипроуглемаш, ДонУГИ, ИГД им. А.А. Скочинского, МакНИИ, ГОАО НИПКИ «Углемеханизация», ОАО «Луганскгормаш». Среди зарубежных компаний следует выделить BECKER MINING SYSTEMS AG, BECORIT GmbH, GTA MASCHINENSYSTEME GmbH, NEUHAUSER GmbH, SMT SCHARF AG (Германия), BEVEX-BANSKY VYSKUM spol. s.r.o. (Словакия), Grupa FAMUR, SIGMA S.A (Польша), FITE a.s., FERRIT s.r.o., STAVUS (Чехия).

Методики расчета основных параметров и режимов работы шахтных подвесных монорельсовых локомотивов, приведенные в научных публикациях, не в полной мере учитывают особенности эксплуатации, которые непосредственно влияют на технико-экономические показатели тяговых единиц. Обобщить сведения и дать универсальные рекомендации по оценке эффективности различных видов тяги шахтных подвесных монорельсовых локомотивов представляется затруднительным. Выполненный обзор расчетно-теоретических основ для создания подвесных монорельсовых дорог свидетельствует о необходимости разработки новых подходов при обосновании технико-экономических показателей и режимов работы шахтных монорельсовых локомотивов.

На основании анализа конструкций шахтных монорельсовых дорог в более ранних исследованиях выявлены основные требования к обеспечению безопасного использования монорельсов при одновременном увеличении допустимой скорости движения. Определены динамические нагрузки и влияние параметров тормозной системы (время отпуска, тормозное усилие, частота применения тормоза) на подвеску монорельсовой дороги [6].

На основе анализа технических характеристик и недостатков шахтного подвесного вспомогательного транспорта рассмотрены перспективы применения литий-ионных аккумуляторных батарей в качестве тяговых на шахтных локомотивах [7]. Однако в данной работе не рассматриваются вопросы оценки

и обоснования эффективности эксплуатации данного вида транспорта.

Предметом исследований становятся также технические характеристики подвесной монорельсовой дороги с локомотивным органом тяги [8]. Разработаны соответствующие методики тяговых расчетов и ходовые диаграммы подвесных дизелевозов.

Приведенные данные относятся к дизельным подвесным монорельсовым локомотивам, но для аккумуляторных нуждаются в проверке и уточнении.

Большое значение имеют работы, связанные с определением энергопотребления и пройденного пути аккумуляторным подвесным локомотивом, полученные закономерности не учитывают изменение коэффициента полезного действия энергетической цепи, которое происходит при изменении режимов работы локомотива [9].

Обоснованию параметров монорельсовых локомотивов во время движения по вертикальным и горизонтальным закруглениям пути, режимов пуска и торможения шахтной подвесной монорельсовой дороги посвящены достаточно интересные работы [10–13].

Основные положения рассмотренных работ не определяют в полной мере особенности режимов эксплуатации, поскольку не учитывают технико-экономические показатели тяговых единиц монорельсовых локомотивов.

Работа шахтной подвесной монорельсовой дороги характеризуется несколькими режимами: реализация тягового усилия (тяговый режим); создание замедляющих усилий (тормозной режим); работа на холостом ходу (режим выбега). Все эти режимы в достаточной мере исследованы для напочвенных и подвесных локомотивов, но не отражают в полной мере обобщающих технико-экономических показателей работы тяговых средств шахтных подвесных монорельсовых дорог.

Результаты и их обсуждение

Рассмотрим силовую установку подвесного монорельсового дизелевоза. Известно, что основными технико-экономическими показателями дизельных двигателей являются:

- индикаторная мощность N_i – мощность, развиваемая рабочими газами в цилиндрах дизеля в результате давления рабочего тела, действующего на поршень;

- эффективная мощность N_e – мощность, получаемая на коленчатом валу дизеля. Иными словами, это разность индикаторной мощности N_i и мощности, затрачиваемой на преодоление сил трения в дизеле и приведение в действие вспомогательных устройств N_m , равная $N_e = N_i - N_m$;

- механический коэффициент полезного действия дизеля η_m (КПД) – отношение эффективной мощности к индикаторной $\eta_m = N_e / N_i$.

Также для оценки технико-экономических показателей дизельных двигателей на практике применяется ряд характеристик (графических зависимостей нескольких параметров работы дизеля друг от друга). Вид характеристики определяется по независимой



переменной, в качестве которой выбирается один из эксплуатационных или конструктивных параметров, таких как: мощность, расход топлива и частота вращения коленчатого вала. Как правило, данные характеристики получают при стендовых испытаниях дизелей в специализированных лабораториях.

При проектировании транспортных машин и комплексов подземных разработок используются в основном два показателя эффективности [14].

Транспортная мощность, тм/ч:

$$\lambda = V\gamma L,$$

где V – производительность транспортной машины, м³/ч; γ – насыпная масса, т/м³; L – расстояние транспортирования груза, м.

Расчетная производительность горно-транспортной машины:

$$Q_p = \frac{k_H}{k_{BP}} Q_{cp},$$

где k_H – коэффициент неравномерности поступления груза; k_{BP} – коэффициент использования машины во времени; Q_{cp} – средняя часовая производительность за смену, т/ч.

Данные показатели в полной мере справедливы для горно-транспортных машин, участвующих в технологическом процессе транспортировки основного груза, однако для вспомогательных транспортных машин подвесных монорельсовых дорог требуются уточнения.

Для оценки эффективности эксплуатации шахтных монорельсовых дизелевозов целесообразно использовать комплексный показатель оценки эффективности дизельной тяги.

В работах [15–17] предложено рассчитывать сравнительную эффективность дизельной тяги с удельным расходом топлива при заданном режиме эксплуатации, г / кВт · ч,

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n b_i N_{ei} \tau_i}{\sum_{i=1}^n N_{ei} \tau_i} \rightarrow \min,$$

где b_i – удельный расход топлива на i -м режиме эксплуатации, г / кВт · ч; N_{ei} – эффективная мощность на i -м режиме эксплуатации, кВт; τ_i – время работы на i -м режиме эксплуатации, ч.

При решении задач оптимизации определяется целевая функция или критерий качества, в качестве которого принимается минимум расхода топлива при постоянной частоте вращения коленчатого вала, а именно $W = B \rightarrow \min$ [18].

Для подвесных шахтных монорельсовых дизелевозов предлагается следующая взаимосвязь его характеристик с силовой энергетической установкой.

КПД дизелевоза в тяговом режиме определяется произведением КПД агрегатов, входящих в его энергетическую цепь $\eta_{дв} = \eta_e \cdot \eta_{сн} \cdot \eta_{га} \cdot \eta_{ты} \cdot \eta_{за}$, где η_e – эффективный КПД силовой установки (дизельного двигателя); $\eta_{сн}$ – условный КПД вспомогательных систем

и агрегатов собственных нужд; $\eta_{га}$ – КПД гидравлического агрегата; $\eta_{ты}$ – КПД тягового устройства, $\eta_{за}$ – КПД зубчатой передачи.

Изменение экономичности дизелевоза в процессе работы в общем случае определяется относительным изменением КПД агрегатов, а его эксплуатационный КПД:

$$\eta_{двз}(t) = \int_t \eta_{дв} \left(\frac{1}{\eta_e} \frac{d\eta_e}{dt} + \frac{1}{\eta_{сн}} \frac{d\eta_{сн}}{dt} + \frac{1}{\eta_{га}} \frac{d\eta_{га}}{dt} + \frac{1}{\eta_{ты}} \frac{d\eta_{ты}}{dt} + \frac{1}{\eta_{за}} \frac{d\eta_{за}}{dt} \right) dt. \quad (1)$$

Оптимальной соответствует характеристика дизелевоза, для которой $\eta_{двз}$ будет максимальным $W = \eta_{двз} \rightarrow \max$.

В свою очередь изменение КПД агрегатов энергетической цепи дизелевоза, входящих в (1), определяется зависимостями:

$$\begin{aligned} \frac{d\eta_e}{dt} &= \frac{\partial \eta_e}{\partial n} \frac{dn}{dt} + \frac{\partial \eta_e}{\partial N_e} \frac{dN_e}{dt}; \\ \frac{d\eta_{сн}}{dt} &= \frac{\partial \eta_{сн}}{\partial n} \frac{dn}{dt} + \frac{\partial \eta_{сн}}{\partial N_e} \frac{dN_e}{dt} + \frac{\partial \eta_{сн}}{\partial N_{сн}} \frac{dN_{сн}}{dt}; \\ \frac{d\eta_{га}}{dt} &= \frac{\partial \eta_{га}}{\partial n} \frac{dn}{dt} + \frac{\partial \eta_{га}}{\partial P_{га}} \frac{dP_{га}}{dt} + \frac{\partial \eta_{га}}{\partial N_{га}} \frac{dN_{га}}{dt}; \\ \frac{d\eta_{ты}}{dt} &= \frac{\partial \eta_{ты}}{\partial n_{ты}} \frac{dn_{ты}}{dt} + \frac{\partial \eta_{ты}}{\partial P_{га}} \frac{dP_{га}}{dt} + \frac{\partial \eta_{ты}}{\partial N_{ты}} \frac{dN_{ты}}{dt}; \\ \frac{d\eta_{за}}{dt} &= \frac{\partial \eta_{за}}{\partial n_{ты}} \frac{dn_{ты}}{dt} + \frac{\partial \eta_{за}}{\partial P_{га}} \frac{dP_{га}}{dt} + \frac{\partial \eta_{за}}{\partial N_{ты}} \frac{dN_{ты}}{dt}, \end{aligned} \quad (2)$$

где n – частота вращения коленчатого вала дизеля, с⁻¹; N_e – эффективная мощность дизеля, кВт; $N_{сн}$ – мощность агрегатов собственных нужд, кВт; $P_{га}$ – давление гидравлического агрегата, МПа; $N_{га}$ – мощность гидравлического агрегата, кВт; $n_{ты}$ – частота вращения приводного вала тягового устройства, с⁻¹; $N_{ты}$ – мощность тягового устройства, кВт.

В случае отсутствия зубчатой передачи в тяговом устройстве, член

$$\frac{1}{\eta_{за}} \frac{d\eta_{за}}{dt}$$

в уравнении (1) будет равняться 0, а выражение

$$\frac{d\eta_{за}}{dt}$$

исключается из системы (2).

Установление функциональных зависимостей для всех параметров, входящих в уравнения (2), представляет собой громоздкую и трудоемкую задачу. Для анализа удобно все эти параметры разделить на следующие основные группы:

– параметры, зависящие от экономических характеристик силовой установки –

$$\eta_e, \frac{\partial \eta_e}{\partial n}, \frac{\partial \eta_e}{\partial N_e}$$

и режимов ее работы –

$$n, N_e, \frac{dn}{dt}, \frac{dN_e}{dt};$$

– параметры, зависящие от экономических характеристик вспомогательных агрегатов –

$$\eta_{ch}, \frac{\partial \eta_{ch}}{\partial n}, \frac{\partial \eta_{ch}}{\partial N_e}, \frac{\partial \eta_{ch}}{\partial N_{ch}}$$

и режимов их работы –

$$N_{ch}, N_e, n, \frac{dN_{ch}}{dt}, \frac{dN_e}{dt}, \frac{dn}{dt};$$

– параметры, зависящие от экономических характеристик агрегатов передачи мощности – $\eta_{га}, \eta_{ту},$

$$\frac{\partial \eta_{га}}{\partial n}, \frac{\partial \eta_{га}}{\partial P_{га}}, \frac{\partial \eta_{га}}{\partial N_{га}}, \frac{\partial \eta_{ту}}{\partial n}, \frac{\partial \eta_{ту}}{\partial P_{га}}, \frac{\partial \eta_{ту}}{\partial N_{ту}}, \frac{\partial \eta_{зп}}{\partial n}, \frac{\partial \eta_{зп}}{\partial P_{га}}, \frac{\partial \eta_{зп}}{\partial N_{ту}}$$

и режимов их работы –

$$n, n_{ту}, N_{га}, N_{ту}, P_{га}, \frac{dn_{ту}}{dt}, \frac{dn}{dt}, \frac{dP_{га}}{dt}, \frac{dN_{га}}{dt}, \frac{dN_{ту}}{dt}.$$

Таким образом, эксплуатационный КПД дизель-воза в целом определяется как экономическими характеристиками всех агрегатов его энергетической цепи, так и режимами их работы. Однако если режимы работы тяговых устройств и передачи мощности целиком и полностью определяются тяговым режимом дизель-воза, то режимы работы вспомогательных агрегатов и силовой установки зависят от ее скоростных характеристик.

Приняв допущения, учитывающие технико-экономические характеристики дизель-возов и их наиболее типичные режимы работы, мы получили результаты расчетов эксплуатационного КПД для опытной поездки дизель-воза SCHARF DZ 1500 на шахте Комсомолец Донбасса (рис. 3).

Аналогичным образом, имея данные опытных поездок или определив функции параметров и режимов работы аккумуляторных автономных шахтных подвесных локомотивов, можно вычислить их эксплуатационный КПД, зная который, можно выполнить обоснование параметров и режимов эксплуатации аккумуляторных локомотивов.

Закключение

Изменение экономичности шахтных дизель-воза и аккумуляторного подвесного монорельсового локомотива в процессе работы в общем случае определяется относительным изменением КПД агрегатов. Для автономных подвесных шахтных монорельсовых локомотивов с дизельной и электрической тягой предложена взаимосвязь его характеристик с силовой энергетической установкой. Определение оптимальных технико-экономических показателей шахтных монорельсовых локомотивов целесообразно выполнять по комплексному параметру – эксплуатационному коэффициенту полезного действия локомотива.

Эксплуатационный КПД дизель-воза в целом определяется как экономическими характеристиками всех агрегатов его энергетической цепи, так и режимами их работы. Однако если режимы работы тяговых устройств и передачи мощности целиком и полностью определяются тяговым режимом дизель-воза, то режимы работы вспомогательных агрегатов и силовой установки зависят от ее скоростных характеристик.

Определив функции параметров и режимов работы автономных шахтных подвесных локомотивов, можно вычислить эксплуатационный КПД дизельной или аккумуляторной тяги, что в свою очередь позволит выполнить обоснование параметров и режимов работы автономных шахтных подвесных монорельсовых локомотивов.

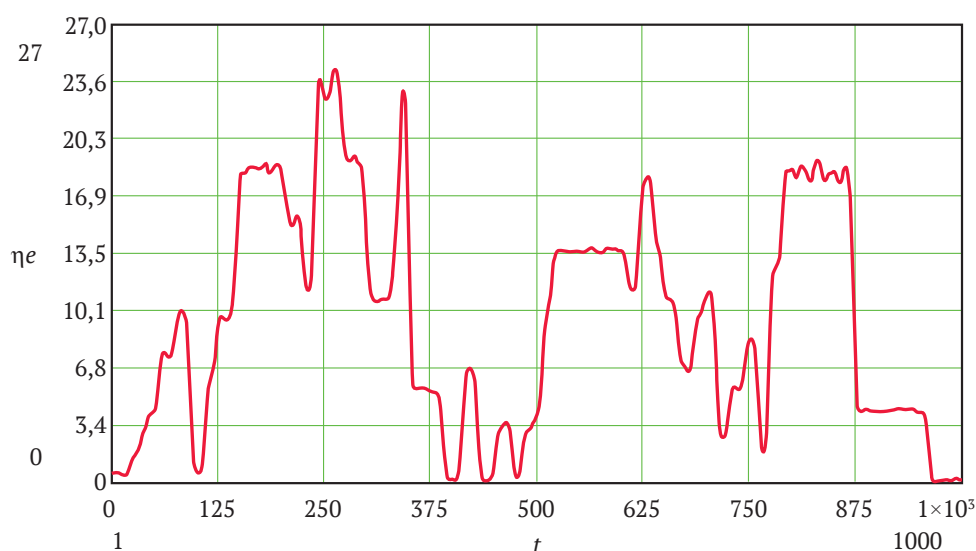


Рис. 3. Изменение эксплуатационного КПД дизель-воза SCHARF DZ 1500 для опытной поездки:

η_e – эксплуатационный КПД дизель-воза, %; t – время поездки, с

Fig. 3. Varying operational efficiency factor of SCHARFDZ 1500 diesel locomotive for a test trip:

η_e – operational efficiency factor of diesel locomotive, %; t – travel time, s



Список литературы

1. Гутаревич В. О. *Динамика шахтных подвесных монорельсовых дорог*. Донецк: ЛАНДОН-XXI; 2014. 206 с.
2. Васильев К. А., Николаев А. К., Сазонов К. Г. *Транспортные машины и оборудование шахт и рудников*. СПб.: Лань; 2012. 544 с.
3. Грядущий Б. А. (общ. ред.) *Шахтный подземный транспорт: в 2 т. Т 1. Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт*. Научно-исследовательский институт горной механики им. М. М. Федорова. Донецк: ВИК; 2011. 481 с.
4. Ferrit. *Global Mining Solution*. URL: <https://www.ferrit.cz/en/products/suspended-monorail-transport/diesel-locomotives/dlz210f> (дата обращения: 22.05.2021)
5. Ferrit. *Global Mining Solution*. URL: <https://www.ferrit.cz/en/products/suspended-monorail-transport/accumulator-locomotives/dlza90f> (дата обращения: 22.05.2021)
6. Szewerda K., Tokarczyk J., Wiczorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
7. Pieczora E., Suffner H. Rozwój napędów dołowych kolejek podwieszonych. *Maszyny Górnicze*. 2017;(3):44–57. URL: <http://komag.eu/images/maszynygornicze1/2017/MG%203-20174.pdf>
8. Кондрашин А. Ю. Методика расчета технических характеристик подвесной монорельсовой дороги с локомотивным органом тяги. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009;(S10):56–76. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13858294>
9. Konsek R. Elektryczny napęd górniczych kolejek podwieszonych, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*. 2017;113(1):195–198. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1544916>
10. Gutarevych V. Dynamic model of movement of mine suspended monorail. *Transport Problems*. 2014;9(1):13–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24195861>
11. Gutarevych V., Vodolazskaya N. V., Jakupović E., Mirjanić D. Research on the influence of dynamic load on suspended monorail. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;806:23–29. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.806.23>
12. Szewerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>
13. Herbus K., Szewerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksplorat. Niezawodn.* 2020;4:610–619. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
14. Кантович Л. И., Хазанович Г. Ш., Волков В. В., Воронова Э. Ю., Отроков А. В., Черных В. Г. *Машины и оборудование для горностроительных работ*. М.: Горная книга; 2013. 445 с.
15. Кузнецов С. Р., Васильева М. А. Параметры, определяющие энергоэффективность карьерных автосамосвалов. *Записки Горного института*. 2014;209:185–189. URL: <https://pmi.spmi.ru/index.php/pmi/article/view/5305>
16. Володин А. И., Кирияков М. Н. Оптимизация тепловозной характеристики дизеля для микропроцессорных систем управления электропередачей тепловозов. *Известия Транссиба*. 2012;(1):12–19.
17. Александров В. И., Васильева М. А., Коптев В. Эффективная мощность и скорость движения карьерных автосамосвалов в режиме топливной экономичности. *Записки Горного института*. 2019;239:556–563. <https://doi.org/10.31897/PMI.2019.5.556>
18. Коссов Е. Е., Старовойт В. А. Выбор характеристик магистральных и маневровых тепловозов. В: *Повышение топливной экономичности тепловозов. Труды ВНИИЖТ*. 1991. 238 с.

References

1. Gutarevich V. O. *Dynamics of mine suspended monorails*. Donetsk: LONDON-XXI Publ. House; 2014. 206 p. (In Russ.).
2. Vasiliev K. A., Nikolaev A. K., Sazonov K. G. *Transport machines and equipment for mines*. St. Petersburg: Lan' Publ.; 2012. 544 p. (In Russ.).
3. Gryadushchy B. A. (gen. ed.) *Mine underground transport: in 2 volumes. Vol. 1. Mine locomotive and rail transport*. M. M. Fedorov Mining Mechanical Engineering Research Institute. Donetsk: VIK Publ.; 2011. 481 p. (In Russ.).
4. Ferrit. *Global Mining Solution*. URL: <https://www.ferrit.cz/en/products/suspended-monorail-transport/diesel-locomotives/dlz210f> (Accessed: 22.05.2021)
5. Ferrit. *Global Mining Solution*. URL: <https://www.ferrit.cz/en/products/suspended-monorail-transport/accumulator-locomotives/dlza90f> (Accessed: 22.05.2021)



6. Szezerda K., Tokarczyk J., Wiczorek A. Impact of increased travel speed of a transportation set on the dynamic parameters of a mine suspended monorail. *Energies*. 2021;14(6):1528. <https://doi.org/10.3390/en14061528>
7. Pieczora E., Suffner H. Rozwój napędów dołowych kolejek podwieszonych. *Maszyny Górnicze*. 2017;(3):44–57. URL: <http://komag.eu/images/maszynygornicze/2017/MG%203-20174.pdf>
8. Kondrashin A. Yu. Methodology for calculating the technical characteristics of a suspended monorail with locomotive traction. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2009;(S10):56–76. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=13858294>
9. Konsek R. Elektryczny napęd górniczych kolejek podwieszonych, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*. 2017;113(1):195–198. URL: <https://journals.indexcopernicus.com/search/article?articleId=1544916>
10. Gutarevich V. Dynamic model of movement of mine suspended monorail. *Transport Problems*. 2014;9(1):13–18. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24195861>
11. Gutarevich V., Vodolazskaya N. V., Jakupović E., Mirjanić D. Research on the influence of dynamic load on suspended monorail. *Applied Mechanics and Materials*. 2015;806:23–29. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.806.23>
12. Szezerda K. Supporting development of suspended underground monorails using virtual prototyping techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;545:012018. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/545/1/012018>
13. Herbus K., Szezerda K., Swider J. Virtual prototyping of the suspended monorail in the aspect of increasing the permissible travel speed in hard coal mines. *Eksplorat. Niezawodn.* 2020;4:610–619. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2020.4.4>
14. Kantovich L. I., Khazanovich G. Sh., Volkov V. V., Voronova E. Yu. et al. *Machinery and Equipment for Mine Construction*. Moscow: Gornaya Kniga Publ.; 2013, 445 p. (In Russ.).
15. Kuznetsov S. R., Vasil'eva M. A. The parameters defining power efficiency of dump trucks in opencast mine. *Journal of Mining Institute*. 2014;209:185–189. (In Russ.).
16. Volodin A. I., Kirjakov M. N. Optimization of the diesel characteristic of the diesel engine for microprocessor control systems electricity transmission of diesel locomotives. *Izvestiya Transsiba*. 2012;(1):12–19. (In Russ.).
17. Alexandrov V. I., Vasileva M. A., Koptev V. Y. Effective power and speed of mining dump trucks in fuel economy mode. *Journal of Mining Institute*. 2019;239:556–563. <https://doi.org/10.31897/pmi.2019.5.556>
18. Kossov E. E., Starovoi V. A. Selection of characteristics of mainline and shunting locomotives. In: *Improving the fuel efficiency of diesel locomotives. Proceedings of VNIIZhT*. 1991. 238 p. (In Russ.).

Информация об авторах

Константин Александрович Рябко – к.т.н., доцент, декан факультета, Донецкий институт железнодорожного транспорта, г. Донецк, Украина, e-mail: railroader@yandex.ru

Виктор Олегович Гутаревич – д.т.н., доцент, профессор кафедры Транспортных систем и логистики им. И. Г. Штокмана, Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина; Scopus ID 55633624800, ORCID 0000-0002-6294-5232

Information about the authors

Konstantin A. Ryabko – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Dean of the Faculty, Donetsk Institute of Railway Transport, Donetsk, Ukraine, e-mail: railroader@yandex.ru

Viktor O. Gutarevich – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Transport Systems and Logistics named after I. G. Shtokman, Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine; Scopus ID 55633624800, ORCID 0000-0002-6294-5232

Поступила в редакцию 30.04.2021

Поступила после рецензирования 14.06.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 30.04.2021

Revised 14.06.2021

Accepted 15.06.2021



ПОДГОТОВКА ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КАДРОВ. ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>

Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России

А. А. Верчеба

*Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе «МГРИ»,
г. Москва, Российская Федерация*✉ aa_ver@mail.ru

Аннотация

Развитие минерально-сырьевой базы объективно связано с кадровым потенциалом горно-геологической отрасли. Краткий анализ направлений развития геологической отрасли и реализуемых проектов демонстрирует масштаб технологических задач, которые стоят перед отраслью. Россия на протяжении последних десятилетий сталкивается с серьёзными проблемами, которые могут стать сдерживающими факторами в развитии экономики, региональном развитии страны, реализации национальных проектов. Одной из проблем является подготовка кадров для отрасли. С целью решения такой комплексной задачи были разработаны федеральные государственные образовательные стандарты подготовки специалистов по специальностям «Прикладная геология», «Технология геологической разведки». Образовательными стандартами предусматривается формирование актуальных для отрасли профессиональных компетенций будущих геологов. Сопоставление компетентностных моделей стандарта с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий при осуществлении государственной научно-технологической политики России показывает, что они позволяют университетам сформировать программы подготовки геологов, отвечающих на современные вызовы. Особую роль в обеспечении качества подготовки геологов играют программы практик. Они играют решающую роль в формировании универсальных и профессиональных компетенций и открывают будущему специалисту мир субкультуры профессионалов в этой области, что очень важно для молодого человека, связывающего свое будущее с геологией. В работе отмечается значительная роль в формировании кадрового потенциала горно-геологической отрасли государства, академического и профессионального сообщества – университетов, компаний, исследовательских и общественных организаций. Определена острая потребность в создании отечественной системы профессиональных квалификаций (горный инженер, горный инженер-геолог, горный инженер-гидрогеолог, горный инженер по бурению скважин, горный инженер-геохимик, горный инженер-геофизик и др.), которая должна обеспечить гармонизацию требований к уровню подготовки специалистов для отрасли.

Ключевые слова

прикладная геология, горное дело, минеральные ресурсы, геологическое изучение недр, подготовка кадров, обучение, университет, горный инженер, геолог

Для цитирования

Верчеба А. А. Подготовка кадров для горно-геологической отрасли России. *Горные науки и технологии*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>

PROFESSIONAL PERSONNEL TRAINING

Research article

Personnel training for the mining and geological sector of Russia

А. А. Vercheba

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting “MGRI”, Moscow, Russian Federation✉ aa_ver@mail.ru

Abstract

Mineral resource base development objectively requires high-quality human resources for mining and geological sector. A brief analysis of the geological sector development tendencies and ongoing projects demonstrates the scale of technological challenges facing the sector. Over the past decades, Russia has been facing serious problems that can become constraining factors in economic development, regional development, and the implementation of national projects. Training of specialists for the sector is one of the challenges. In order to solve such a complex problem, Federal State Educational Standards for training of specialists in the specialties “Applied Geology”, “Geological Exploration Technique” were developed. The Educational Standards provide for the formation of future geologists’ professional competencies relevant to the industry. Comparison of the



competence models of the Standards with the main priority lines of the development of science and technologies in framework of the implementation of the state scientific and technological policy of Russia shows that they allow universities to form programs for geologist training that respond to modern challenges. Internship (field training) programs play a special role in ensuring the quality of training for geologists. They play a decisive role in the formation of universal and professional competencies and open the world of a subculture of professionals in this field to the future specialists that is very important for a young person who devotes his future to geology. The paper highlights a significant role of the government, the academic and professional community – universities, companies, research and public organizations – in the formation of human resources for the mining and geological sector. An urgent need was identified for the creation of a domestic system of professional qualifications (mining engineer, mining engineer-geologist, mining engineer-hydrogeologist, mining engineer for drilling wells, mining engineer-geochemist, mining engineer-geophysicist, etc.), which should ensure harmonization of the requirements for the level of specialist competence for the industry.

Keywords

applied geology, mining, mineral resources, geological exploration, personnel training, education, university, mining engineer, geologist

For citation

Vercheba A. A. Personnel training for the mining and geological sector of Russia. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(2):144–153. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-2-144-153>

Введение

Федеральное учебно-методическое объединение в системе высшего образования всегда уделяет внимание вопросам концептуального развития горно-геологического образования, имеющего большое значение для экономики всей страны [1]. Технологии геологической разведки полезных ископаемых и горное дело традиционно тесно связаны друг с другом, что предопределяет во многом профессиональное и академическое единство научно-педагогических школ университетов. В то же время для выявления важного инвариантного содержания образования и выработки подходов к оценке его качества необходимо детально рассматривать значимые аспекты каждого элемента подготовки специалистов для минерально-сырьевого комплекса страны [2–4]. Именно поэтому представляемая публикация посвящается горно-геологическому образованию.

С развитием геологии и горных наук в наше время меняется и мировоззрение горно-геологического образования. Высшее горно-геологическое образование не только набор универсальных и общепрофессиональных компетенций, установленных в федеральных государственных образовательных стандартах по специальностям и направлениям подготовки укрупненной группы специальностей «Прикладная геология, горное дело, нефтегазовое дело и геодезия»¹, но и новое мировоззрение, отражающее культурные,

социальные и экономические отношения в современном мире. Необходимо отметить, что в формировании этих отношений и их реализации принимают самое активное участие государство, академическое и профессиональное сообщества – университеты, компании, исследовательские и общественные организации.

Какие же инновации несут в себе современные горно-геологические науки? Какое место они занимают в системе естественных наук и технологий современности?

Первым на мировоззренческое значение горных наук и их влияния на общественный прогресс обратил внимание гениальный российский ученый и философ Михайло Ломоносов.

«Наука, которая учит минералы знать, приискивать и приводить в такое состояние, чтобы они в обществе человеческом угодны были, называется горная наука» / М. В. Ломоносов, 1742 г. /

Современное определение науки как особого вида познавательной деятельности человека также подчеркивает её фундаментальное значение для преобразования общества. Мы по праву и с гордостью должны считать М. Ломоносова нашим великим современником. Вопросам геологии и горного дела он посвятил целый ряд трудов, среди которых наиболее фундаментальными были «Слово о рождении металлов от трясения земли», трактат «О слоях земных» и книга «Первые основания металлургии или рудных дел». В этих работах, ставших первыми русскими научными изданиями и учебными пособиями по геологии и горному делу, учёный высказал идеи эволюции природы, основанные на материалистических воззрениях и не потерявшие своего значения до настоящего времени. Как и во многих других естественных науках, в геологии и горном деле М. Ломоносов далеко превзошёл уровень знаний своего времени, опередив многих признанных основателей современной геологической науки.

В XXI в. главное в геологии – изменение мировоззрения. Важными проблемами становятся экономические и экологические особенности освоения ми-

¹ Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 21.05.04 Горное дело. М.: Минобрнауки; 2020. 25 с. URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Spec/210504_C_3_18062021.pdf; Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 21.05.02 Прикладная геология. М.: Минобрнауки; 2020. 18 с. URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Spec/210502_C_3_18062021.pdf; Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования – специалитет по специальности 21.05.03 Технология геологической разведки. М.: Минобрнауки; 2020. 28 с. URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/FGOS%20VO%203++/Spec/210503_C_3_18062021.pdf



неральных ресурсов, геология становится не только наукой, но и производственной сферой.

«В мировом масштабе выживет та страна, которая в точности будет знать свои ресурсы, сумеет направить на их использование народные духовные силы», – писал наш великий соотечественник академик В. И. Вернадский [5]. Он был глубоко прав. Человек, как и все живое, неразрывно связан со всей окружающей его природой. Из нее он черпает все свои жизненные силы – как материальные, так и энергетические, и духовные.

Следовательно, знать состояние своих минеральных ресурсов, уметь их достоверно оценивать и рационально использовать – цивилизационная задача, которая решается такой наукой, как геология. Естественно, что успешность работы геологической отрасли в этом случае определяется качеством ее кадрового потенциала, задача формирования которого является государственной задачей.

Тенденции развития и актуальные проекты геологической отрасли в России

Для формализации масштаба задач, которые необходимо решать инженерному кадровому потенциалу горно-геологической отрасли приведем краткое описание ее проектных характеристик.

Прикладное значение геологии и горного дела состоит не только в развитии минерально-сырьевой базы и минерально-сырьевого комплекса России, но и в обеспечении горно-геологическим обоснованием инженерных и строительных работ, проводимых в различных сферах материального производства.

Ресурсы полезных ископаемых являются ограниченными и относительно исчерпаемыми, и многие важные источники материалов и энергии уже близки к физическому истощению [6, 7]. В России ежегодно добывается более 130 видов твердых полезных ископаемых, в том числе: золото, алмазы, металлы платиновой группы, серебро, медь, полиметаллы, железная руда и др. Экономическое значение развития минерально-сырьевой базы полезных ископаемых России трудно переоценить. По данным информационного агентства Росбизнесконсалтинг (РБК), только в апреле–мае 2021 г. российские компании экспортировали 65,4 т золота на 3,55 млрд долл. США и за этот же период «Газпром» продал за рубеж топлива на 2,4 млрд долл. США.

В России геологоразведочные работы в 2020 г. проводились главным образом на территории Дальневосточного и Сибирского федеральных округов более чем по 70 объектам, в том числе в пределах арктической зоны. В ходе работ получен прирост запасов по золоту, никелю, углю и ряду видов неметаллических полезных ископаемых. На Государственный баланс поставлены запасы почти 100 месторождений твердых полезных ископаемых.

По результатам геологоразведочных работ в настоящее время создаются новые центры добычи медных руд на ресурсной базе и инфраструктуре Удоканского месторождения медистых песчаников и крупных медно-порфировых месторождений на

территории Дальнего Востока – Песчанка и Малмыж. На Малмыжском месторождении в 2021 г. предполагается строительство горно-обогажительного комбината (ГОК) производительностью до 130 тыс. т меди. На выявление медно-порфировых месторождений в Дальневосточном регионе направлено проведение поисковых геологоразведочных работ. Дальний Восток в ближайшем будущем станет одним из перспективных районов для развития медной и золоторудной промышленности. Здесь может быть создан крупнейший медный кластер России, не уступающий Уральской и Норильской минерально-сырьевым базам.

Неравномерность размещения минеральных ресурсов на территории страны обусловлена разнообразием географических и геологических условий их проявлений. Так, в последние годы выявлены большие запасы и ресурсы большинства видов стратегических полезных ископаемых (газ, нефть, уголь, благородные металлы, алмазы, медь, никель, цветные и легирующие металлы, железо, апатит, калийные соли и др.) на фоне дефицита запасов в недрах бокситов, руд хрома и марганца, фосфоритов, барита, бентонита и каолина². В последние годы сохраняются низкие темпы прироста прогнозных ресурсов из-за сокращения поискового задела.

Объективные трудности начала XXI в. заключаются в том, что бюджет отрасли сокращен, а прирост запасов по некоторым видам твердых полезных ископаемых находится в «красной» зоне. В то же время для создания минерально-сырьевой базы полезных ископаемых необходимо иметь фонд поискового задела и необходимое финансирование геологоразведочных работ в объеме около 100 млрд руб. в год³. Также из-за сложных географических условий и расположения более 60% территории страны в зоне многолетнемерзлых пород отмечается слабая инвестиционная привлекательность проектов освоения месторождений полезных ископаемых в арктической зоне России. Планируемое финансирование на проведение геологоразведочных работ только на воспроизводство минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых составляет всего 5,0–5,5 млрд руб.

Проблема исчерпания поискового задела, отставание регионального изучения недр, проведения опережающих поисковых работ привели к сокращению объема локализованных прогнозных ресурсов и уменьшению надежности оценки прогнозных ресурсов. Эксперты сходятся во мнении, что объективными трудностями геологического изучения недр России,

² Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 85 с.; Итоги работы федерального агентства по недропользованию в 2018 году. Информационно-аналитические материалы. М.: Минприроды. 2019. 56 с.; Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. № 2914-р.

³ Итоги работы федерального агентства по недропользованию в 2018 году. Информационно-аналитические материалы. М.: Минприроды. 2019. 56 с.



помимо отсутствия поискового задела на некоторые виды твердых полезных ископаемых и металлогенического потенциала на многие востребованные виды полезных ископаемых, являются:

- дефицит некоторых видов минерального сырья (хромовые и марганцевые руды, бокситы, редкие металлы и др.);
- низкие, а по ряду видов полезных ископаемых – отрицательные темпы воспроизводства запасов в недрах;
- низкий технологический уровень переработки руды на обогатительных фабриках;
- снижение кадрового потенциала горно-геологической отрасли⁴.

Понимая, что горно-геологическая отрасль, являясь основой для металлургии, можно утверждать, что надёжность минерально-сырьевой базы металлургии определяется созданием новых редкометалльных и редкоземельных рудных объектов, развитием инновационных технологий освоения их ресурсов для обеспечения потребностей военно-промышленного комплекса и импортозамещения. Согласно «Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года» предстоит создание крупных рудных баз коренного золота на юге Сибири и на Дальнем Востоке, поддержание производства россыпного золота в районах добычных работ предприятий и серебра в Западном Верхоянье. В Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия) важной задачей геологического изучения недр остаются локализация и оценка новых перспективных алмазодонных площадей.

Освоение крупнотоннажных месторождений крайне важно для таких видов полезных ископаемых, как черные и цветные металлы, уран, редкоземельные оксиды, драгоценные металлы и алмазы, неметаллические полезные ископаемые. По железным рудам необходимо освоение горнодобывающих районов Западной Сибири и создание горнодобывающих предприятий на Дальнем Востоке. Для труднообогатимых силикатных и карбонатных руд марганца необходимо совершенствование способов его извлечения по методам технологической минералогии. Полиметаллические руды предстоит вовлекать в производство за счет освоения месторождений Рудного Алтая. Предстоит также реанимировать исторические месторождения вольфрама и молибдена с решением технологических проблем их комплексного освоения⁵ [8].

Для оптимизации географии сырьевой базы неметаллических полезных ископаемых, сокращения импортных поставок следует рассчитывать на выявление качественных и технологичных типов неметаллов и строительных материалов [8]. Успех реализации

этих приоритетных направлений основывается на современных тенденциях, установившихся в комплексном геологическом изучении недр страны и использовании энергосберегающих технологий переработки и обогащения минерального сырья.

Для выполнения сложных работ по запланированному приросту запасов и ресурсов полезных ископаемых и особенно стратегических видов твердых полезных ископаемых необходим высокий профессионализм кадров и их надёжный кадровый резерв.

Основные направления развития кадрового потенциала геологической отрасли

Эксперты неоднократно отмечали, что воспроизводство минеральных ресурсов коррелируется с качеством подготовки кадров для горно-геологической отрасли. Грамотное решение создания кадрового резерва горно-геологоразведочной сферы требует минимальных дополнительных ассигнований в размере не более 1–1,5% от годового финансирования геологоразведочных работ для модернизации практической деятельности студентов в вузах, для развития цифровой образовательной среды и программ практик горно-геологическими вузами и факультетами. Особенно необходимо это сделать на современном этапе, когда новые федеральные государственные образовательные стандарты подготовки специалистов высшего образования по прикладной геологии и горному делу поднимают планку качественной подготовки горных инженеров.

На территории России действует свыше 150 горно-обогатительных фабрик для получения продуктов высокой технической ценности, предназначенных для дальнейшего промышленного использования. Так, в Забайкалье в кратчайшие сроки построен Быстринский ГОК на базе разведанного Быстринского комплексного железо-медно-скарнового месторождения. Выход комбината на проектную мощность планируется в 2021 г. Таким образом, обеспечение рационального использования минеральных ресурсов является важным направлением развития национальной экономики, в котором лидирующую роль должны сыграть молодые профессионалы⁶.

Горно-геологическое образование должно стать «драйвером» дальнейшего развития таких приоритетных научно-технологических и научно-технических направлений, как [9]:

- переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам;
- создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;
- переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки минерального сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;

⁴ Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 85 с.; Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. № 2914-р.

⁵ Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. № 2914-р.

⁶ Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. № 2914-р.



– формирование эффективного ответа на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития.

Стратегией развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года предусмотрено наращивание минерально-сырьевой базы за счет увеличения инвестиционной привлекательности горных и геологоразведочных работ всех стадий, роста качества прогнозирования и поисков новых месторождений, повышения эффективности освоения известных, в том числе неразрабатываемых, месторождений путём внедрения современных технологий переработки, обогащения и комплексного извлечения полезных ископаемых, повышение уровня геологической изученности страны⁷. Это потребует изменения в развитии образовательных траекторий высшего геологического и горно-геологического образования России и формирования отраслевой системы непрерывного геологического образования на базе создания специализированных базовых кафедр и центров компетенций в университетах, научно-исследовательских и производственных организациях.

Академическое сообщество откликнулось на эти сложные и масштабные задачи, и практически одновременно с разработкой Стратегии в 2020 г. Минобрнауки России был утвержден Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования (ФГОС ВО-2020) по специальности «Прикладная геология», являющийся ориентиром подготовки высококвалифицированных кадров для воспроизводства, развития и использования минерально-сырьевой базы страны на длительный период.

Отличительной особенностью ФГОС ВО-2020 является то, что вуз формирует требования к результатам освоения образовательной программы в виде универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций выпускников (далее – компетенции).

Компетентностный подход к оценке результатов высшего геологического образования и реализация принципа сопряженности компетенций выпускников вузов с квалификационными требованиями и трудовыми функциями специалистов-геологов принципиально отличают эту модель образования от образовательных стандартов прошлого века. Это позволяет настроить образовательные программы на востребованные типы профессиональной деятельности: научно-исследовательскую, проектно-изыскательскую, производственно-технологическую, педагогическую и организационно-управленческую.

Установленные в ФГОС ВО-20 компетенции выпускников вузов, отражающие результаты освоения программы высшего образования построены по иерархическому принципу – от универсальных для горно-геологической отрасли, общепрофессиональных, учитывающих требования профессиональной инженерной подготовки, и профессиональных, отра-

жающих особенности обучения по специализациям. Универсальные компетенции отражают потребность в формировании у выпускников естественно-научного мировоззрения, а общепрофессиональные и профессиональные – оценивают их знания и навыки в одном из типов будущей профессиональной деятельности. Например, по специальности «Прикладная геология месторождений твёрдых полезных ископаемых» подготовка специалистов будет осуществляться по следующим специализациям (профилям или направлениям) выпускников:

- геологическая съемка, поиски и разведка месторождений твердых полезных ископаемых;
- разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых;
- прикладная геохимия, минералогия и геммология.

Нами были проанализированы установленные в ФГОС ВО-2020 универсальные и общепрофессиональные компетенции выпускников на предмет их сопряженности с приоритетными направлениями научно-технологического развития (НТР) России, относящимися к развитию минерально-сырьевого комплекса⁸. К таким приоритетным направлениям относятся:

- переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта;

- переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии;

- связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики.

По первому направлению образовательными программами предусмотрено формирование следующих компетенций выпускников:

- способность работать с программным обеспечением общего, специального назначения, в том числе моделировать горные и геологические объекты;
- способность применять основные методы, способы и средства получения, хранения и обработки информации, используя навыки работы с компьютером как средством управления информацией.

Второе приоритетное направление научно-технологического развития в образовательных программах будет отражено в освоении такой универсальной компетенции выпускника, как способность создавать

⁷ Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 22.12.2018 г. № 2914-р.

⁸ Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 85 с.



и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества.

Ко второму приоритетному направлению научно-технологического развития следует отнести формирование следующих общепрофессиональных компетенций выпускников:

- способность применять правовые основы геологического изучения недр и недропользования, обеспечения экологической и промышленной безопасности и умение их учитывать при поисках, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также строительстве;

- способность применять методы обеспечения безопасности жизнедеятельности, в том числе в условиях чрезвычайных ситуаций, при производстве работ по геологическому изучению недр, поискам, разведке, добыче и переработке полезных ископаемых, промышленно-гражданскому строительству.

Третье приоритетное направление научно-технологического развития России в минерально-сырьевом секторе реализуется предусмотренными Стратегией развития минерально-сырьевой базы России мероприятиями по проведению геологоразведочных работ в Арктике. В связи с изменением климата начнется эффективное использование Северного Морского пути, что будет способствовать диверсификации экономики региона, повышению технологического уровня, а также дальнейшему развитию и освоению МСБ арктической зоны Российской Федерации⁹.

Для формирования навыков по освоению минерально-сырьевой базы арктических территорий России в ФГОС ВО-2020 были включены общепрофессиональные компетенции выпускника:

- способность применять основные положения естественных наук и научных теорий при проведении научно-исследовательских работ по изучению и воспроизводству минерально-сырьевой базы;

- способность применять навыки анализа горно-геологических условий при поисках, оценке, разведке и добыче полезных ископаемых, а также при гражданском строительстве.

Таким образом, выполнение основных приоритетных направлений развития науки и технологий при осуществлении государственной научно-технологической политики позволит сформировать компетенции, необходимые для перехода к реализации новых приоритетов научно-технологического развития Российской Федерации, отвечающих на большие вызовы современной цивилизации.

Установленная сопряженность компетенций выпускников вузов как индикатора совокупности горно-геологических знаний, навыков и умений с приоритетными направлениями научно-технологического

развития России позволяет считать, новые стандарты ФГОС ВО-2020 будут способствовать подготовке профессионалов, готовых непосредственно после окончания вуза работать в сфере практического развития минерально-сырьевого комплекса.

Важными направлениями в области изучения и освоения недр, отраженные в ФГОВ ВО-2020, стали:

- создание технологии прогнозирования минеральных ресурсов на основе новой металлогенической парадигмы с минимизацией экономических рисков, обусловленных проведением региональных и опережающих поисковых геологоразведочных работ;

- использование геотехнологических способов добычи и физико-химических геотехнологий (скважинное подземное выщелачивание, скважинная гидродобыча и подземная газификация угля);

- разработка ресурсосберегающих способов технологической минералогии по глубокой и полной переработке комплексных труднообогатимых руд;

- освоение крупнотоннажных месторождений полезных ископаемых на больших глубинах;

- разведка и оценка стратегических видов полезных ископаемых.

Особое значение в горно-геологическом образовании уделяется важному для государства направлению – минерально-сырьевой базе стратегических видов полезных ископаемых. Сведения об объемах запасов, объемах добычи и потребления стратегических видов полезных ископаемых сейчас относятся к государственной тайне. Указ об этом, подписанный 8 июня 2020 г. Президентом России В. Путиным, разделяет сведения об объемах балансовых запасов в недрах, уровне добычи и потребления стратегических видов полезных ископаемых, к которым относятся никель, кобальт, тантал, ниобий, бериллий, литий, редкие земли иттриевой группы, особое чистое кварцевое сырье. В связи с этим в новые ФГОС ВО-2020 введены требования к разработке и реализации образовательных программ с учетом требований, предусмотренных нормативными правовыми актами в области защиты государственной тайны.

Пути решения проблем геологического изучения недр непосредственно связаны с необходимостью подготовки высококвалифицированных специалистов по широкому спектру направлений, методике, технике и технологии геологоразведочных работ с учётом вышеперечисленных специфических факторов современного периода и перспектив развития минерально-сырьевой базы страны, позиционирования России на международных рынках, в том числе минерально-сырьевых и технологических¹⁰ [10].

Мы полагаем, что в соответствии с разработанной моделью ФГОС 3 (2020) появится возможность создать гибкую и быстро реагирующую на различные объективные вызовы систему профессиональных квалификаций: горный инженер, горный инженер-геолог; горный инженер-гидрогеолог; горный инженер по бурению скважин; горный инженер-геохимик, гор-

⁹ Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 85 с.; Итоги работы федерального агентства по недропользованию в 2018 году. Информационно-аналитические материалы. М.: Минприроды. 2019. 56 с.

¹⁰ Геология будущего. Геологическая отрасль Российской Федерации к началу 2050-х годов. Информационно-аналитические материалы. М.: АО «Росгеология», 2017. 85 с.



ный инженер-геофизик, и таким образом настроить систему подготовки специалистов по прикладной геологии на удовлетворение актуального и перспективного состояния рынка труда российской геологии.

Роль программ практик в обеспечении качества подготовки специалистов для горно-геологической отрасли

Качественное геологическое профессиональное образование не может быть осуществлено без должной практической подготовки – выездных полевых производственных геологических практик в развитых горнорудных и удалённых неизученных районах. Учебные и производственные практики являются обязательными элементами практической деятельности студентов и охватывают весь период обучения.

Практики делятся на два типа – учебные и производственные. К учебным практикам традиционно относятся геологическая ознакомительная практика, геологическая полевая практика и научно-исследовательская работа. Производственные практики могут быть представлены следующими типами: производственная технологическая практика на горно-геологических объектах, проектно-технологическая практика в научно-исследовательских институтах и научно-исследовательская работа.

Университеты, опираясь на образовательный стандарт, имеют право выбрать один или несколько типов учебной практики и один или несколько типов производственной практики в зависимости от специализации при освоении программы и подготовки к решению научно-исследовательских, проектно-исследовательских, производственно-технологических, педагогических или организационно-управленческих задач.

Есть определенные сложности в планировании программ практик, которые связаны со значительными затратами, в том числе транспортными. Но необходимо отметить, что государство предусматривает эти расходы в бюджетной субсидии при финансировании высшего образования, а решение вопроса кроется в правильном планировании.

Будущий геолог или горняк без экспедиционной практики не может быть специалистом по геологическому изучению и освоению недр. Более того, молодой специалист после нескольких лет работы в экспедиционных условиях начинает глубоко понимать особенности геологического строения изучаемых площадей и объектов. Ведь не случайно, что в процессе практической работы происходит дифференциация общепрофессиональных и профессиональных компетенций будущих выпускников по территориальному и минерально-сырьевому направлениям. Этот процесс имеет важное значение при изучении сложных природных объектов в геологии [10]. Не стоит забывать, что именно экспедиционные условия определяют вход в профессиональную геологическую субкультуру, определяют будущую принадлежность к профессиональному сообществу профессионалов-геологов.

В качестве примера таких практик можно привести студенческие изучения комплексных сульфидных месторождений Норильского рудного района [11–15]. На этих месторождениях полноценную геологическую производственную практику проходят студенты всех направлений подготовки горных инженеров. Особенно продуктивна практика для студентов-геологов, имеющих возможность работать на должностях техников-геологов как в полевых, так и в подземных условиях. Студенты-практиканты оз-



Рис. 1. Студенты МГРИ на геологической практике

Fig 1. MGRI students during geological field training



накопились со сложным геологическим строением месторождений, содержащих сульфидные медно-никелевые руды с высокой концентрацией металлов платиновой группы, особенностями их разработки и переработки. Нами были получены новые данные, существенно дополняющие информацию о закономерностях локализации комплексных медно-никелевых руд. Установлена особенность локализации сульфидных руд месторождений в подстилающих породах – девонских известняках и глинах с пластами ангидрита, который образуется при испарении морской воды в замкнутых водоемах.

Изучение месторождений Норильской группы вскрыло исключительно богатые залежи, состоящие сплошь из сульфидов. Массивные руды мощностью более 50 м представляют собой застывшую рудоносную магму – природный штейн. Зарубежные аналоги заметно беднее. Наличие богатых руд объясняется ассимиляцией серы и кальция из осадочных пород [16–18]. Среди сплошных руд выделены три типа пиротиновых, два типа кубанитовых, а также три типа халькопиритовых руд. Прожилково-вкрапленные руды содержат ассоциации сульфидов, но среди них встречаются пирит, миллерит, борнит и халькозин [11, 12, 19, 20]. Залегание базальтовых силлов среди осадочных сульфатных пород обусловило высокую концентрацию сероводорода в расплаве. Это доказано аномально высоким содержанием тяжелого изотопа $\Delta^{34}\text{S}$ в сульфидных рудах и коррелируется с преобладанием $\Delta^{34}\text{S}$ в ангидрите осадочных толщ, подстилающих сульфидное оруденение. Подобные процессы получили название сульфуризации [18, 21, 22].

Заимствование базальтовым расплавом аномального количества изотопов тяжелой серы из осадочных толщ привело к тому, что на дне расплава образовалась уникальная массивная сульфидная руда. Норильские медно-никелевые сульфидные руды повсеместно резко обогащены тяжелым изотопом серы [16–18]. Полученные данные, в том числе на материалах, со-

бранных студентами во время прохождения производственных и преддипломных практик, позволяют прогнозировать богатые по содержанию меди минерализованные участки рудных залежей.

Такие результаты студенческих геологических практик несут не только учебный характер, но и прикладной, что позволяет этим результатам и студентам, их создавшим, быть востребованными на конкретных предприятиях.

Закключение

Новые федеральные государственные образовательные стандарты высшего образования по горным и геологическим специальностям развивают в университетах гибкую модель подготовки специалистов, которая позволяет отвечать на современные вызовы геологической отрасли в кадровых потребностях.

Практическая подготовка будущих горных инженеров, геологов играет решающую роль в обеспечении качества подготовки, университеты должны приложить максимум усилий для организации геологических и производственных практик, а компании и организации предоставить технологические площадки для полигонов практик.

Горно-геологическое академическое и профессиональное сообщество должно приложить усилия для формирования отечественной системы профессиональных квалификаций: горный инженер, горный инженер-технолог, горный инженер-геолог, горный инженер-гидрогеолог, горный инженер по бурению скважин, горный инженер-геохимик, горный инженер-геофизик и др., которая должна обеспечить гармонизацию требований к уровню подготовки специалистов для отрасли. Это позволит настроить систему подготовки выпускников по горному делу, прикладной геологии и технологии геологической разведки на удовлетворение актуального и перспективного состояния рынка труда российской горно-геологической отрасли.

Список литературы

1. Puchkov L. A. World crisis as a consequence of excess energy consumption. *Eurasian Mining*. 2015;(2):7–10. <https://doi.org/10.17580/em.2015.02.02>
2. Petrov V. L. Federal training and guideline association on applied geology, mining, oil and gas production and geodesy – A new stage of government, academic community and industry cooperation. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(9):115–119. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.09.23>
3. Puchkov L. A., Petrov V. L. The system of higher mining education in Russia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):57–60. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.14>
4. Petrov V. L. Training of mineral dressing engineers at Russian Universities. *Tsvetnye Metally*. 2017;(7):14–19. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.02>
5. Вернадский В. И. О науке. Т. 1. Научное знание. Научное творчество. Научная мысль. Дубна: Феникс, 1997. С. 11–67.
6. Козловский Е. А. (ред.) *Справочник руководителя геологической организации (предприятия)*: в 2 т. Т. 1. М.: ЦПУ «Радуга»; 2017. 672 с.
7. Козловский Е. А. (ред.) *Справочник руководителя геологической организации (предприятия)*: в 2 т. Т. 2. М.: ЦПУ «Радуга»; 2017. 398 с.
8. Беневольский Б. И. Минерально-сырьевой потенциал – базовый элемент экономического суверенитета и национальной безопасности России. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2015;(5):50–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24314368>



9. О стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Указ Президента РФ от 01.12.2016. № 642.

10. Верчеба А. А., Оганесян Л. В. Пути совершенствования высшего геологического образования. *Разведка и охрана недр*. 2016;(12):3–8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27809937>

11. Дистлер В. В., Служеникин С. Ф., Кабри Л. Дж. и др. Платиновые руды Норильских расслоенных интрузивов: соотношение магматического и флюидального концентрирования благородных металлов. *Геология рудных месторождений*. 1999;41(3):241–265.

12. Дымкин А. М., Чайка В. М. *Эволюция накопления природных соединений железа*. М.: Наука; 1992.

13. Кривоуцкая Н. А. Эволюция траппового магматизма и Pt–Cu–Ni рудообразование в Норильском районе. М: Товарищество научных изданий КМК; 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/289984876_Evolucia_trappovogo_magmatizma_i_Pt-Cu-Ni_rudoobrazovanie_v_Norilskom_rajone

14. Мирошникова Л. К., Склянов В. И., Уфатова З. Г. *Минералы сульфидных медно-никелевых платино-содержащих руд Норильско-Талнахской группы месторождений*. Норильск: Изд-во Норильский индустриальный институт; 2019. 148 с.

15. Krivolutsкая N. A. *Siberian traps and Pt-Cu-Ni deposits in Norilsk area*. Springer, Cham. 2016. 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17205-7>

16. Горбачев Н. С., Гриненко Л. Н. Изотопный состав серы сульфидов и сульфатов Октябрьского месторождения сульфидных руд (Норильский район) в связи с вопросами его генезиса. *Геохимия*. 1973;(8):1127–1136.

17. Горбачев Н. С., Каширцева Г. А. *Флюидно-магматическая дифференциация базальтовых магм и магматическое сульфидообразование*. М.: Наука, 1986. С. 96–119.

18. Портнов А. М. Уникальная рудно-изотопная аномалия России. *Природа*. 2018;(2):3–9.

19. Sluzhenikin S. F., Krivolutsкая N. A., Rodkov V. A., Distler V. V. Ultra-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE-Cu-Ni sulfide deposits of the Norilsk Province. Field Trip Guidebook. In: O. N. Simonov (ed.). *12th International Platinum Symposium*. Ekaterinburg; 2014. 83 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1649.8009>

20. Yujian W., Xianbiao L., Yanrong L. Petrogenesis and Ni-Cu-Co Sulfide Formation of Mafic Enclaves in Tulaergen Mafic-Ultramafic Intrusive Rocks, Eastern Tianshan, Northwest China: Implications for Liquid Immiscibility and Hydrothermal Remobilization of Platinum-Group Elements. *Economic Geology*. 2018;113(8):1795–1816. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4613>

21. Портнов А. М. Золотой дождь астроблем. *Природа*. 2021;(2):15–23. <https://doi.org/10.7868/S0032874X21020022>

22. Cheney E. S., Lange I. M. Evidence for sulfurization and the origin on some Sudbury-type ores. *Mineralium Deposita*. 1997;(2):80–94. <https://doi.org/10.1007/BF00206581>

References

1. Puchkov L. A. World crisis as a consequence of excess energy consumption. *Eurasian Mining*. 2015;(2):7–10. <https://doi.org/10.17580/em.2015.02.02>

2. Petrov V. L. Federal training and guideline association on applied geology, mining, oil and gas production and geodesy – A new stage of government, academic community and industry cooperation. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(9):115–119. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.09.23>

3. Puchkov L. A., Petrov V. L. The system of higher mining education in Russia. *Eurasian Mining*. 2017;(2):57–60. <https://doi.org/10.17580/em.2017.02.14>

4. Petrov V. L. Training of mineral dressing engineers at Russian Universities. *Tsvetnye Metally*. 2017;(7):14–19. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.07.02>

5. Vernadsky V. I. *About science. Vol. 1. Scientific knowledge. Scientific creativity. Scientific thought*. Dubna: Feniks Publ.; 1997. P. 11–67. (In Russ.).

6. Kozlovsky E. A. (Ed.) *Reference book for a geological organization (enterprise) head*. Vol. 1. Moscow: TsPU Raduga Publ.; 2017. 672 p. (In Russ.).

7. Kozlovsky E. A. (Ed.) *Reference book for a geological organization (enterprise) head*. Vol. 2. Moscow: TsPU Raduga Publ.; 2017. 398 p. (In Russ.).

8. Benevolsky B. I. Mineral resource potential – a base element of the economic sovereignty and national security of Russia. *Mineral Recourses of Russia. Economics and Management*. 2015;(5):50–59. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24314368>

9. *On the strategy of scientific and technological development of the Russian Federation*. Decree of the President of the Russian Federation No. 642 dated January 12. 2016. (In Russ.).

10. Vercheba A. A., Oganessian L. V. Ways of improving the higher geological education. *Razvedka i okhrana nedr*. 2016;(12):3–8. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27809937>

11. Distler V. V., Sluzhenikin S. F., Cabri L. J. et al. Platinum ores of the Norilsk layered intrusions: ratio of magmatic and fluidic concentration of precious metals. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 1999;41(3):241–265. (In Russ.).



12. Dymkin A. M., Chaika V. M. *Evolution of natural iron compounds accumulation*. Moscow: Nauka Publ., 1992. (In Russ.).
13. Krivolutskaya N. A. *Evolution of trap magmatism and Pt–Cu–Ni ore formation in the Norilsk district*. Moscow: KMK Scientific Publication Partnership Publ.; 2013. (In Russ.). URL: https://www.researchgate.net/publication/289984876_Evolucia_trappovogo_magmatizma_i_Pt-Cu-Ni_rudoobrazovanie_v_Norilskom_rajone
14. Miroshnikova L. K., Sklyanov V. I., Ufatova Z. G. *Minerals of sulfide copper-nickel platinum-bearing ores of the Norilsk-Talnakh group of deposits*. Norilsk: Norilsk Industrial Institute Publ.; 2019. 148 p. (In Russ.).
15. Krivolutskaya N. A. *Siberian traps and Pt–Cu–Ni deposits in Norilsk area*. Springer, Cham. 2016. 361 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17205-7>
16. Gorbachev N. S., Grinenko L. N. Sulfur isotopic composition in sulfides and sulfates of the Oktyabrsky sulfide ore deposit (Norilsk district) in connection with issues of its genesis. *Geokhimiya*. 1973; (8):1127–1136. (In Russ.).
17. Gorbachev N. S., Kashirtseva G. A. *Fluid-magmatic differentiation of basaltic magma and magmatic sulfide formation*. Moscow: Nauka Publ.; 1986. P. 96–119. (In Russ.).
18. Portnov A. M. Ore-isotopic anomaly of Russia. *Priroda*. 2018;(2):3–9.
19. Sluzhenikin S. F., Krivolutskaya N. A., Rodkov V. A., Distler V. V. Ultra-mafic intrusions, volcanic rocks and PGE–Cu–Ni sulfide deposits of the Norilsk Province. Field Trip Guidebook. In: O. N. Simonov (ed.). *12th International Platinum Symposium*. Ekaterinburg; 2014. 83 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1649.8009>
20. Yujian W., Xianbiao L., Yanrong L. Petrogenesis and Ni–Cu–Co Sulfide Formation of Mafic Enclaves in Tulaergen Mafic-Ultramafic Intrusive Rocks, Eastern Tianshan, Northwest China: Implications for Liquid Immiscibility and Hydrothermal Remobilization of Platinum-Group Elements. *Economic Geology*. 2018;113(8):1795–1816. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4613>
21. Portnov A. M. Astrobleme golden rain. *Priroda*. 2021;(2):15–23. <https://doi.org/10.7868/S0032874X21020022>
22. Cheney E. S., Lange I. M. Evidence for sulfurization and the origin on some Sudbury-type ores. *Mineralium Deposita*. 1997;(2):80–94. <https://doi.org/10.1007/BF00206581>

Информация об авторе

Александр Александрович Верчеба – доктор геол.-минерал. наук, профессор, помощник проректора по учебной работе, профессор кафедры геологии месторождений полезных ископаемых, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе «МГРИ», г. Москва, Россия, Scopus ID [57205211946](https://orcid.org/0000-0002-5720-5211), e-mail: aa_ver@mail.ru

Information about the author

Alexander A. Vercheba – Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Professor, Assistant Vice Rector, Professor of the Department of Geology of Mineral Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting “MGRI”, Moscow, Russian Federation, Scopus ID [57205211946](https://orcid.org/0000-0002-5720-5211), e-mail: aa_ver@mail.ru

Поступила в редакцию 11.03.2021

Поступила после рецензирования 29.05.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Received 11.03.2021

Revised 29.05.2021

Accepted 15.06.2021