

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

3 2023



MINERALS AND MINING ENGINEERING

**IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENII
GORNYI ZHURNAL**

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ



ISSN 2686-9853 (Online)

ISSN 0536-1028 (Print)

Учредитель и издатель
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный горный университет»

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал

MINERALS AND MINING
ENGINEERING

Scientific and technical journal

ВЫПУСК 3
ISSUE 3

2023

Уральский государственный горный университет
Ural State Mining University

Известия высших учебных заведений. Горный журнал. № 3, 2023
Minerals and Mining Engineering. No. 3, 2023

eLIBRARY.RU



Электронно-библиотечная
система



ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY



ИВИС
ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСЛУГИ

EBSCO

Information Services

Журнал выходит 6 раз в год

Известия высших учебных заведений. Горный журнал – рецензируемый научно-технический журнал, публикующий статьи в области горной науки, горного образования, добычи и переработки полезных ископаемых.

К публикации принимаются статьи на русском и английском языках. Полнотекстовая версия журнала публикуется в свободном доступе на сайте <https://mining-science.ru>, а также на платформе Российского индекса научного цитирования (РИНЦ). Более полная информация и правила оформления статей размещены на сайте журнала

The journal is issued 6 times a year

Minerals and Mining Engineering is a peer-reviewed scientific and technical journal that publishes scientific articles on mining, mining education, mineral extraction and processing. The journal accepts articles in Russian and English for publication. Full-text articles are freely available on the website of the journal <http://mining-science.ru> and in the database of Russian Science Citation Index (RISC). Please visit the journal's website for details and article submission guidelines

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» (в соответствии с распоряжением Минобрнауки России от 28 декабря 2018 г. № 90-р)

Журнал распространяется по подписке агентством «Урал-Пресс»

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-76015 от 19.06.2019 выдано **Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций**

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издается с 1958 года

Выходит 6 раз в год

№ 3, 2023

Учредитель и издатель

УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Главный редактор

Н. Г. ВАЛИЕВ, Уральский государственный горный университет,
г. Екатеринбург

Заместитель главного редактора

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Аленичев В. М. *Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург*
Апакашев Р. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Афанасьев А. И. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Бабенко А. Г. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Битимбаев М. Ж. *Корпорация Казахмыс, г. Караганда, Республика Казахстан*
Блинков О. Г. *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*
Боярских Г. А. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Галиев С. Ж. *Национальная академия наук Республики Казахстан, г. Алматы, Республика Казахстан*
Гордеев В. А. *Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар*
Давыдов С. Я. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Демин В. Ф. *Карагандинский технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан*
Дондов Д. *Монгольский государственный университет науки и технологий, г. Улан-Батор, Монголия*
Дребенштедт К. *Фрайбергская горная академия, г. Фрайберг, Федеративная Республика Германия*
Душин А. В. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Жабко А. В. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Зелинская Е. В. *Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск*
Зобнин Б. Б. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Зырянов И. В. *Северо-Восточный федеральный университет, г. Мирный*
Игнатьева М. Н. *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
Калмыков В. Н. *Магнитогорский государственный технический университет, г. Магнитогорск*

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ГОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Научно-технический журнал. Издаётся с 1958 года

Выходит 6 раз в год

№ 3, 2023

- Картозия Б. А.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
- Кашников Ю. А.** *Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь*
- Козин В. З.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Комиссаров А. П.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Косарев Н. П.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Косолапов А. И.** *Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*
- Кравчук И. Л.** *Институт горного дела УрО РАН, г. Челябинск*
- Лагунова Ю. А.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Лапин С. Э.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Лапин Э. С.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Литвиненко В. С.** *Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербурга*
- Макаров В. Н.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Мочалова Л. А.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Носырев М. Б.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Панкратенко А. Н.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
- Петров В. Л.** *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва*
- Пивняк Г. Г.** *Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», г. Днепр, Украина*
- Придвижкин С. В.** *Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург*
- Расулов С. Р.** *Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика*
- Рыльникова М. В.** *Институт проблем комплексного освоения недр РАН, г. Москва*
- Семин А. Н.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Симисинов Д. И.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Стровский В. Е.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Топалов С. Й.** *Университет горного дела и геологии Св. Иоанна Рыльского, г. София, Республика Болгария*
- Трыбальский К.** *Научно-технический университет им. С. Сташица, г. Краков, Республика Польша*
- Цыпин Е. Ф.** *Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург*
- Филатов В. В.** *Владимирский государственный университет, г. Владимир*
- Яковлев В. Л.** *Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург*

MINERALS AND MINING ENGINEERING

Scientific and technical journal. First published in 1958

6 issues a year

No. 3, 2023

Founder and publisher

URAL STATE MINING UNIVERSITY

Editor-in-chief

N. G. VALIEV, Ural State Mining University, Ekaterinburg

Deputy editor-in-chief

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

EDITORIAL BOARD

Alenichev V. M. *Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg*

Apakashev R. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Afanasiev A. I. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Babenko A. G. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Bitimbaev M. Zh. *Kazakhmys Corporation, Karaganda, Republic of Kazakhstan*

Blinkov O. G. *Ural Federal University, Ekaterinburg*

Boiarskikh G. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Galiev S. Zh. *National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Almaty,
Republic of Kazakhstan*

Gordeev V. A. *Kuban State Technological University, Krasnodar*

Davydov S. Ia. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Demin V. F. *Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan*

Dondov D. *The Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaatar, Mongolia*

Drebenstedt C. *Freiberg Mining Academy, Freiberg, Federal Republic of Germany*

Dushin A. V. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Zhabko A. V. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Zelinskaia E. V. *Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk*

Zobnin B. B. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

Zyrianov I. V. *North-Eastern Federal University, Mirny*

Ignatieva M. N. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*

MINERALS AND MINING ENGINEERING

Scientific and technical journal. First published in 1958

6 issues a year

No. 3, 2023

Kalmykov V. N. *Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk*
Kartozia B. A. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Kashnikov Iu. A. *Perm National Research Polytechnic University, Perm*
Kozin V. Z. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Komissarov A. P. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Kosarev N. P. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Kosolapov A. I. *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*
Kravchuk I. L. *Institute of Mining UB RAS, Chelyabinsk*
Lagunova Iu. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Lapin S. E. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Lapin E. S. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Litvinenko V. S. *Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg*
Makarov V. N. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Mochalova L. A. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Nosyrev M. B. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Pankratenko A. N. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Petrov V. L. *National University of Science and Technology "MISIS", Moscow*
Pivniak G. G. *Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine*
Pridvzhkin S. V. *Ural Federal University, Ekaterinburg*
Rasulov S. R. *Azerbaijan State Oil Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan*
Rylnikova M. V. *Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON) RAS, Moscow*
Semin A. N. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Simisinov D. I. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Strovskii V. E. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Topalov S. I. *Sofia University of Mining and Geology, Sofia, Republic of Bulgaria*
Trybalskii K. *AGH University of Science and Technology, Krakow, Republic of Poland*
Tsyypin E. F. *Ural State Mining University, Ekaterinburg*
Filatov V. V. *Vladimir State University, Vladimir*
Iakovlev V. L. *Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg*

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГОРНЫЕ МАШИНЫ

<i>Коротков Ю. Г., Картавцев В. К., Сенькин А. В., Лунев К. А., Колупаев И. Е.</i> Повышение наработки скважинных электроцентробежных насосов за счет применения самоочищающихся фильтров (In English)	9
<i>Шемякин С. А., Шишкин Е. А.</i> Определение максимального усилия поворота ковша гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой.....	17
<i>Демченко И. И., Игнатова О. С.</i> Конструкция и определение основных параметров струнного ступенчатого грохота.....	25

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

<i>Горинов В. С.</i> Морозоустойчивые эмульсионные взрывчатые вещества (In English).....	36
<i>Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г.</i> Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования схемы расчета разрушения горных пород шпуровым способом.....	43
<i>Балек А. Е., Харисов Т. Ф., Авдеев А. Н., Харисова О. Д.</i> Обоснование оптимального порядка отработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива.....	55

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

<i>Амосов П. В., Горячев А. А., Малодушев К. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А.</i> Поиск взаимосвязи температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветowych моделей	66
<i>Мамонов С. В., Волкова С. В., Чинова Н. Б., Хисамова А. С., Горайчук П. К.</i> Совершенствование технологии обогащения медно-цинковой руды колчеданного месторождения Уральского типа	86

ОХРАНА ТРУДА

<i>Аленичев В. М.</i> Систематизация техногенных рисков индустриального характера на горнодобывающих предприятиях.....	97
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

<i>Абдрахманов М. И., Гардт Д. А.</i> Разработка инфраструктуры для проведения юнит-тестирования программной реализации системы управления дегазационной вакуум-насосной станцией	113
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

<i>Берсенев Г. П., Кутуев В. А.</i> Итоги IX научно-практической конференции взрывников Урала.....	127
----------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY. MINING MACHINERY

<i>Korotkov Iu. G., Kartavtsev V. K., Senkin A. V., Lunev K. A., Kolupaev I. E.</i> Increasing the operating time of ESP by using self-cleaning filters	9
<i>Shemiakin S. A., Shishkin E. A.</i> Determining the maximum turning force of the hydraulic backhoe excavator bucket.....	17
<i>Demchenko I. I., Ignatova O. S.</i> String stepped screen design and main parameters...	25

GEOMECHANICS. ROCK BREAKING

<i>Gorinov V. S.</i> Frost-resistant emulsion explosives	36
<i>Pershin G. D., Pshenichnaia E. G.</i> Solving the Lamé problem in the quasi-brittle setting to substantiate the solution scheme for rock breaking by the blast-hole method	43
<i>Balek A. E., Kharisov T. F., Avdeev A. N., Kharisova O. D.</i> Substantiation of the optimal mining sequence of an ore deposit under conditions of high stress and low rock mass strength	55

MINERAL PROCESSING

<i>Amosov P. V., Goriachev A. A., Malodushev K. A., Makarov D. V., Masloboev V. A.</i> Searching for the relationship between the temperature and humidity of tailings material by processing digital photographs of laboratory experiments and color models	66
<i>Mamonov S. V., Volkova S. V., Chinova N. B., Khisamova A. S., Goraichuk P. K.</i> Improving the technology of copper-zinc ore beneficiation of a Uralian-type pyrite deposit.....	86

OCCUPATIONAL SAFETY

<i>Alenichev V. M.</i> Systematization of industrial technogenic risks at mining enterprises	97
----------------------------------------------------------------------------------------------------	----

INFORMATION TECHNOLOGY IN MINING

<i>Abdrakhmanov M. I., Gardt D. A.</i> Developing a unit testing framework for control system software implementation of a degassing vacuum pumping station	113
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

HISTORY. DATA. REVIEWS

<i>Bersenev G. P., Kutuev V. A.</i> Results of the 9th Research and Practice Conference of the Ural Shotfirers	127
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ. ГОРНЫЕ МАШИНЫ

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-9-16

Increasing the operating time of electrical submersible pumps by using self-cleaning filters

Iurii G. Korotkov¹, Vadim K. Kartavtsev^{1*}, Anton V. Senkin²,
Kirill A. Lunev¹, Ivan E. Kolupaev¹

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

² OOO ProTekh Engineering, Perm, Russia

*e-mail: vadk10@yandex.ru

Abstract

Introduction. The article considers issues relating to electrical submersible pumps (ESP) work under complicated operating conditions caused by a high content of solids in the pumped borehole fluid. Factors that cause or exacerbate these complications are also studied. The article justifies the urgency of increasing the operating time of submersible equipment under complicated operating conditions.

Methods of research includes analyzing engineering and process approaches to ESP protection from a detrimental effect of solid particles. Within these approaches, specific ways of protecting borehole equipment from hydroabrasive wear are considered. It is concluded that today, in terms of economic indicators and efficiency, borehole and intake filters, mainly slotted, are preferable for ESP protection. The main advantages and disadvantages of known mass-produced slotted filter designs are considered.

Results. The process of production tubing deformation in the course of pumping with ESP is considered and mathematically described. An engineering solution is proposed for a self-cleaning borehole slotted filter which makes it possible to eliminate the main disadvantages of slotted filters, specifically low dirt capacity and the need for tripping operations aimed at restoring the filter's permeability. The method is given for calculating the deformation of the filter element within the slotted filter as part of the ESP below ground.

Conclusions. The use of the described self-cleaning filter will increase the ESP operating time in wells characterized by solids circulation. Reducing trippings, and therefore the downtime of wells, during the operation of ESP with slotted filters will significantly reduce the costs of oil producing enterprises and increase oil production profitability.

Keywords: electric submersible pump; ESP; hydroabrasive wear; self-cleaning borehole slotted filter.

Introduction. More than 80% of oil in the Russia and CIS fields is produced using electric submersible pumps (ESP), and about 60% of oil production wells operate with the use of ESPs [1–3].

A large amount of wells with ESP are classified as complicated, which increases the accident rate of borehole pumping equipment. Failures of ESP elements make tripping necessary, which is accompanied by high material and time expenditures and significantly reduce the profitability of oil production and hence the profit of the mining enterprise [4, 5].

One of the main factors complicating oil recovery by the mechanized method is the presence of solid particles in the recovered borehole fluid. This factor negatively affects ESP operation due to the development of intense hydroabrasive wear and clogging of

the flow channels of electric submersible pump stages. In the Ural and Western Siberia oil fields, the presence of solids in borehole fluid is the cause of up to 30% of ESP failures [6–8].

The current technology of hydraulic fracturing (HF) significantly affects the growth of submersible equipment emergency failures due to hydroabrasive wear. After HF application, the concentration of solid particles in fluid from the borehole newly put into operation increases many times. Up to 67% of the solid particles are loose proppant particles [9, 10]. Under such conditions, ESP operating time is reduced to several days.

It follows from the above that search for and development of process and engineering solutions aimed at increasing ESP operating time under an increased content of solid particles in the pumped borehole fluid is a relevant task, and its solution results are of scientific and practical interest.

Analyzing methods of ESP protection against hydroabrasive wear. Methods of protecting ESP when operating under a high content of solid particles in the produced fluid are usually divided into process and engineering methods.

Process methods include measures for limiting the borehole fluid withdrawal from production wells, cutting ESP operation in intermittent duty, and reducing the intensity of reservoir pressure maintenance systems operation. Attention is also paid to the physicochemical properties of fluids injected into the well and reservoir during various processes. The main disadvantages of the process methods are reduced deliverability of production wells, the complexity of the use, and cost [1, 11, 12].

Engineering methods of ESP protection from the negative impact of solid particles in the borehole fluid include submersible pumps and wear-resistant equipment, as well as front-end equipment as part of the ESP, namely solids separators and filters.

Wear-resistant equipment and submersible pumps are characterized by high surface hardness of the working stage flow parts, which is achieved through the use of wear-resistant materials and special processing methods. ESP hydroabrasive wear resistance is also increased by improving the design and material of seals. The main disadvantage of ESP wear-resistant design is the high cost of pumping units, which is 1.5–2 times higher than the cost of conventional units [13, 14].

The front-end equipment as part of the ESP purifies the pumped borehole fluid from solids. This equipment must provide minimum hydraulic resistance at the intake to submersible pumps under long-term efficient operation.

As part of ESP, separators for solid particles are installed under submersible electric motors (SEM). Solid particles are separated from the borehole fluid under the effect of gravitational and (or) centrifugal forces. Inconsistent efficiency of solids separation is a common disadvantage of solids separators. The separation coefficient depends on many factors, such as the well flow rate, reservoir fluid properties, and solid particles contained in it.

There are two types of ESP filters: surface action filters, which include slotted or wire-wrapped filters, and depth filters represented by filters with porous, disc, or fibrous filter elements.

Filters efficiency is much less affected by borehole conditions than by solids separators. Slotted ESP filters characterized by simple design, high maintainability and low cost, have currently become most widespread [5, 15, 16].

The main disadvantage of the filters is their low dirt capacity. As a result, they become clogged quickly, leading to pump supply failure and ESP failure. The existing

methods for filter cleaning and regeneration under borehole conditions are inefficient, complex and expensive, which limit their application. In practice, filter clogging requires an ESP tripping to replace or clean the filter (unless the filter is equipped with a check valve). When the filter check valve is opened, the pumped liquid bypasses the clogged filter element. However, in this case, the hydroabrasive mixture, which is not cleaned from solids, enters the pump, leading to wear and clogging of ESP working stages [13, 14].

Engineering solutions for increasing ESP operating time when recovering oil with a high content of solids. The authors and JSC Novomet-Perm specialists proposed the design of a self-cleaning slotted ESP filter (Figure 1) [17].

Production tubing 1 within the slotted filter contains filtering section 4 where perforation in the form of through holes 7 is made and reinforcing ribs 3 are installed on the exterior surface. At the ends around production tubing 1, the upper 2 and lower 16 dead stops in the form of buckets are mounted. There are annular gaps between the interior surface of dead stop walls and the exterior surface of production tubing 1. A deformable filter element 8 is concentrically installed around production tubing 1. The filter element is made in the form of wire 5 wound in a spiral, between the turns of which slots 6 are formed. A deformable filter element 8 is installed between the upper dead stop 2 and the movable double-sided stop 13. The end turns of spiral wire 5 of filter element 8 inside the annular gaps are rigidly connected to stops 2 and 13.

Double-sided movable stop 13 moves axially along production tubing 1 along restricting grooves 12 into which the ends of screws 11 are sunk. On the side surface of the double-sided movable stop 13, an elastic element is fixed with screws 11. The elastic element is made in the form of cup 10 with through holes 9.

Cup 10 is in contact with the walls of production string 15 in the well. Between the lower dead stop 16 and the two-sided movable stop 13, supported on their annular platforms, there is spring 14, the force of which exceeds the elastic deformation of the wire of filter element 8.

The slotted filter as part of the submersible pumping unit is lowered into the well. The borehole fluid with solids freely enters the surface of filter element 8 through the through holes 9 of cup 10. Passing between slots 6 of the spirally wound wire 5 turns of filter element 8, the borehole fluid is cleaned. Through holes 7 of filtering section 4 the fluid is fed into production tubing 1 and rises to the borehole pump (not shown in Figure 1). Solid particles, separated from the borehole fluid, settle on the exterior surface of filter element 8, creating “bridges” of deposits and reducing its permeability (throughput) over time.

Filter element 8 is cleaned periodically due to the deformation of the production tubing, on which the ESP is suspended in the well, by changing the pressure at the wellhead.

It is known that the production tubing is deformed by the Δ value when it is filled with liquid and when the excess wellhead pressure P_{wellhead} , atm, is created. The Δ value is calculated using the formula below:

$$\Delta = \frac{10^{-4} L^2}{2E} [\gamma - 2\gamma_{\text{fluid}} (1 - \mu)] + \frac{(1 - 2\mu) F_{\text{fa}} L P_{\text{wellhead}}}{0,1EF}, \quad (1)$$

where Δ is the value of production tubing deformation, m; L is production tubing length, m; E is the modulus of elasticity of production tubing material, MPa; γ is the specific

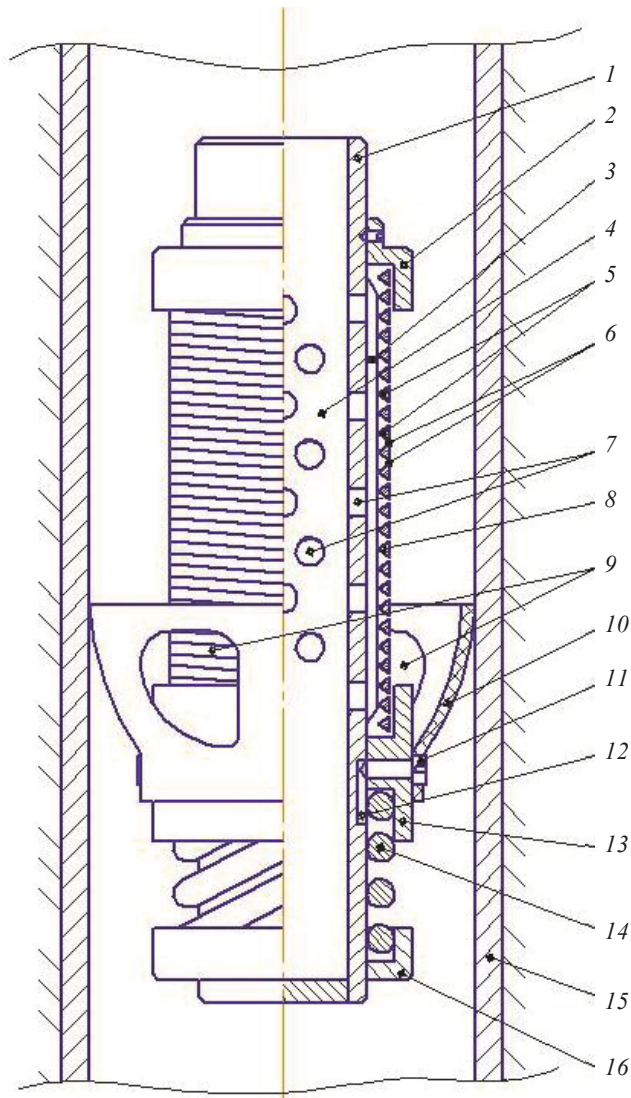


Figure 1. Schematic diagram of a slotted self-cleaning filter with a deformable filter element: 1 – production tubing; 2, 16 – dead stops; 3 – reinforcing ribs of the filter element; 4 – filtering section; 5 – wire; 6 – slots of the filter element; 7 – perforation; 8 – deformable filter element; 9 – cup holes; 10 – cup; 11 – screw; 12 – restricting groove; 13 – movable stop; 14 – spring; 15 – production string

Рисунок 1. Принципиальная схема скважинного щелевого самоочищающегося фильтра с деформируемым фильтроэлементом: 1 – насосно-компрессорные трубы (НКТ); 2, 16 – неподвижные упоры; 3 – ребра жесткости фильтроэлемента; 4 – фильтровальный участок; 5 – проволока; 6 – щелевые каналы фильтрующего элемента; 7 – перфорация; 8 – деформируемый фильтрующий элемент; 9 – отверстия манжеты; 10 – манжета; 11 – винт; 12 – ограничительный паз; 13 – подвижный упор; 14 – силовая пружина; 15 – эксплуатационная колонна

weight of production tubing, N/m^3 ; γ_{fluid} is the specific weight of fluid in the production tubing, N/m^3 ; μ is Poisson's ratio of production tubing material; F_{fa} is the flow area of the pipe, m^2 ; F is the area of the annular cross-section of production tubing, m^2 (RD 39-1-306-79. Instruction on production tubing calculation. Compiled by: A. E. Saroian, S. A. Ulanova, V. I. Belotserkovskii, V. F. Kuznetsov, V. N. Pchelkin; All-Union Scientific Research Institute for the Development and Operation of Oil Country Tubular Goods, Kuybyshev, 1980. 84 p.).

When the value of wellhead pressure changes ($P_{wellhead} = var$) with a filled production tubing, the left side of expression (1) is a constant value, i.e.:

$$\frac{10^{-4}L^2}{2E}[\gamma - 2\gamma_{fluid}(1 - \mu)] = const.$$

Thus, the value of Δ deformation under varying $P_{wellhead}$ is determined by the expression

$$\Delta = \frac{(1 - 2\mu)F_{fa}LP_{wellhead}}{0,1EF}. \tag{2}$$

Let's make a calculation according to formula (2) for the following conditions: the production tubing consists of pipes with an exterior diameter of 73 mm and a wall thickness of 5.5 mm; pipe material is steel 30XMA (foreign analogues are 25CrMo4, 34CrMo4); elasticity modulus of pipe material $E = 2.12 \cdot 10^5$ MPa; Poisson's ratio $\mu = 0.3$; string length $L = 1000$ m; the flow area of the pipes $F_{fa} = 30.2 \cdot 10^{-6}$ m^2 ; annular cross-sectional area of production tubing, $F = 11.7 \cdot 10^{-6}$ m^2 . When the excess pressure at the wellhead $P_{wellhead}$ changes from 0 to 50 atm, the value of the production tubing deformation will be $\Delta = 0.024$ m.

Thus, under increased pressure at the wellhead $P_{wellhead} = 50$ atm and the production tubing length $L = 1000$ m, the submersible pumping unit with a slotted filter is moved (sunk) along the production tubing by $\Delta = 0.024$ m. Pumping unit shutdown and pressure relief at the wellhead to $P_{wellhead} = 0$ atm causes the assembly to rise along the production tubing by the same value $\Delta = 0.024$ m, while cup 10 is in contact with the walls of the string 15 (Figure 1). This causes a short-term stretching of the deformable filter element 8, an increase in the size of slots 6, the destruction of the "bridges" of solid deposits and the restoration of the filter element 8 permeability. Spring 14 then presses movable stop 13 and cup 10, which causes the restoration of the original dimensions of slots 6 and filter element 8.

Thus, periodic mechanical cleaning of the filter element increases the operating time of the slotted filter in the well and the operating time of the ESP.

Conclusions. The article considers and analyzes the ways of protecting well pumps from clogging and hydroabrasive wear under conditions of high concentration of solids in the borehole fluid. The simplest, most common and cost-effective way to protect submersible well pumps is to use filters. However, the time of their effective operation is limited by the low dirt capacity of the filter elements. The authors propose a solution to the problem of increasing ESP operating time in wells complicated by the intense circulation of solid particles. The solution is a self-cleaning filter. The ability to self-clean the filter makes it possible to return the ESP to operation in a short period of time without tripping, which results in increased profitability of oil recovery and increased profits of oil companies.

REFERENCES

1. Shishliannikov D. I., Korotkov Iu. G., Lebedev D. N., Ivanchenko A. A., Frolov S. A. Increasing the operational time of oil well pumping units in conditions of oil production with a high content of solids. *Stroitelstvo neftiannykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more = Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea*. 2022; 5(353): 29–35. (In Russ.)
2. Vasilieva M. A. An overview of development trends for the pumping equipment of mining and processing enterprises. *Obogashchenie Rud*. 2019; 1: 51–56.
3. Vasilyeva M. A. Equipment for generating running magnetic fields for peristaltic transport of heavy oil. In: *Internat. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*. 2017. 8076356. Available from: doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076356
4. Lykova N. A., Shavaleeva A. V., Shishliannikov D. I. Equipment for protecting installations of electric centrifugal pumps under conditions complicated by salt deposition and corrosion. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2017; 7(134): 18–22. (In Russ.)
5. Shishliannikov D. I., Shavaleeva A. V., Kulakov S. V., Korotkov Iu. G. Enhancement of water treatment efficiency in oil fields by using filters manufactured by JSC “Novomet-Perm”. *Neftepromyslovoe delo = Oilfield Engineering*. 2018; 12: 68–73. (In Russ.)
6. Ostrovskii V. G., Shishliannikov D. I., Vorobel S. V. Research of the wear impact of solids particles on the electric-centrifugal pumps nodes. *Oborudovanie i tekhnologii dlia neftegazovogo kompleksa = Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*. 2019; 3(111): 12–16. (In Russ.)
7. Vasilieva M. A., Proskuriakov R. M., Shishliannikov D. I. Application of high viscosity oil peristaltic transportation system with the use of magnetic materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 6: 91–97. (In Russ.)
8. Ostrovskii V. G., Zverev V. Iu. Stand for testing stages of electric-centrifugal oilfield pumps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 7: 102–106. (In Russ.)
9. Alexandrov V. I., Vasilieva M. A. Express-diagnosis of the technical state slurry pumps in systems hydrotransport processing tails of ore. In: *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects. 11th Conf. of the Russian-German Raw Materials, 2018*. 2019. p. 273–282.
10. Shishliannikov D. I., Sofina N. N. Substantiation of rational method of control over work and technical condition parameters of sucker-rod well pumps. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2016; 4: 82–88. (In Russ.)
11. Shishliannikov D. I., Zverev V. Iu., Liginkova Ia. S. Inhibitory protection of electric centrifugal pump units under the complex conditions of salt deposits and corrosion. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2018; 1: 90–98. (In Russ.)
12. Lykova N. A., Shchavaleeva A. V., Shishliannikov D. I. Equipment for protecting installations of electric centrifugal pumps under conditions complicated by salt deposition and corrosion. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2017; 7(134): 18–22. (In Russ.)
13. Shishliannikov D. I., Zverev V. Y., Ivanchenko A. A., Zvonarev I. E. Increasing the time between failures of electric submersible pumps for oil production with high content of mechanical impurities. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2022; 12(1): 1–11. Available from://doi.org/10.3390/app12010064
14. Lykova N. A. Equipment for the electrically driven centrifugal pump unit under conditions of intense circulation of solids. *Inzhenernaia praktika = Engineering Practice*. 2017; 3: 58–62. (In Russ.)
15. Vasilieva M. A. Modeling of wave processes when the heterogeneous flow is moving in a low-frequency magnetic peristaltic pump of pulsating type. *Vibroengineering Procedia*. 2019; 25: 111–115.
16. Iakovlev A. L., Savenok O. V. Analysing the efficiency of the equipment and possible reasons for failure under oil production stimulation in the fields of the Krasnodar region. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2016; 5: 149–163. (In Russ.)
17. Shishliannikov D. I., Shavaleeva A. V., Korotkov Iu. G., Perelman M. O., Poshvin E. V. *Slotted filter*. Patent RF no. 2709580; 2019. (In Russ.)

Received 6 December 2022

Information about the authors:

Jurii G. Korotkov – PhD student, Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: youuura@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9465-5819>

Vadim K. Kartavtsev – student, Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: vadvk10@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-5379-7726>

Anton V. Senkin – Head of the Department of Mine Planning and Design, OOO ProTekh Engineering. E-mail: anton.senkin@pte.eurochem.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2910-6211>

Kirill A. Lunev – student, Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: kooiiuu@yandex.com; <https://orcid.org/0009-0003-8324-1554>

Ivan E. Kolupaev – student, Mining Electromechanics Department, Perm National Research Polytechnic University. E-mail: kol.i.evg@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9079-6883>

Повышение наработки скважинных электроцентробежных насосов за счет применения самоочищающихся фильтров

Коротков Ю. Г.¹, Картавец В. К.¹, Сенькин А. В.², Лунев К. А.¹, Колупаев И. Е.¹

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия.

² ООО «ПроТех Инжиниринг», Пермь, Россия.

Реферат

Введение. Рассмотрены вопросы, связанные с эксплуатацией установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) в условиях, осложненных высоким содержанием механических примесей в перекачиваемой скважинной жидкости, а также факторы, вызывающие или усугубляющие эти осложнения. Обоснована актуальность задачи по повышению наработки погружного оборудования в осложненных условиях эксплуатации.

Методология исследования. Проанализированы технический и технологический подходы к защите УЭЦН от вредного воздействия частиц механических примесей. В рамках этих подходов рассмотрены конкретные способы защиты скважинного оборудования от гидроабразивного износа. Сделан вывод о том, что на сегодняшний день с точки зрения экономических показателей и эффективности предпочтительным является способ защиты УЭЦН, заключающийся в применении скважинных и входных фильтров преимущественно целевого типа. Рассмотрены основные преимущества и недостатки известных серийно выпускаемых конструкций целевых фильтров.

Результаты. Рассмотрен и математически описан процесс деформации колонны насосно-компрессорных труб при эксплуатации скважин с помощью УЭЦН, предложено техническое решение самоочищающегося скважинного целевого фильтра, позволяющее устранить основные недостатки целевых фильтров – низкую грязеемкость и необходимость проведения спуско-подъемных операций для восстановления проницаемости фильтра. Приведена методика расчета деформации фильтроэлемента целевого фильтра в составе УЭЦН, находящейся в скважине.

Выводы. Применение описанного самоочищающегося фильтра позволит повысить наработку УЭЦН в скважинах, характеризующихся выносом частиц механических примесей. Уменьшение количества спускоподъемных операций при эксплуатации УЭЦН, оснащенных целевыми фильтрами, и, соответственно, простоев скважин, существенно снизит издержки нефтедобывающих предприятий и повысит рентабельность добычи нефти.

Ключевые слова: электроцентробежный насос; УЭЦН; гидроабразивный износ; самоочищающийся скважинный целевой фильтр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишлянников Д. И., Коротков Ю. Г., Лебедев Д. Н., Иванченко А. А., Фролов С. А. Повышение наработки скважинных насосных установок в условиях добычи нефти с высоким содержанием механических примесей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2022. № 5(353). С. 29–35.
2. Vasilyeva M. A. An overview of development trends for the pumping equipment of mining and processing enterprises // Obogashchenie Rud. 2019. № 1. P. 51–56.
3. Vasilyeva M. A. Equipment for generating running magnetic fields for peristaltic transport of heavy oil // Internat. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017. 2017. 8076356. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076356
4. Лыкова Н. А., Шавалеева А. В., Шишлянников Д. И. Оборудование для защиты установок электроцентробежных насосов от солеотложений и коррозии // Горное оборудование и электромеханика. 2017. № 7(134). С. 18–22.
5. Шишлянников Д. И., Шавалеева А. В., Кулаков С. В., Коротков Ю. Г. Повышение эффективности водоподготовки на нефтяных промыслах посредством использования фильтров производства АО «Новомет-Пермь» // Нефтепромысловое дело. 2018. № 12. С. 68–73.
6. Островский В. Г., Шишлянников Д. И., Воробель С. В. Исследования процесса изнашивающего воздействия частиц механических примесей на узлы электроцентробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. № 3(111). С. 12–16.
7. Васильева М. А., Проскураков Р. М., Шишлянников Д. И. Применение системы перистальтического транспортирования тяжелых высоковязких нефтей с использованием магнитоактивных материалов // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 6. С. 91–97.

8. Островский В. Г., Зверев В. Ю. Стенд для испытания ступеней электроцентробежных насосов нефтяных промыслов // *Известия вузов. Горный журнал.* 2017. № 7. С. 102–106.

9. Alexandrov V. I., Vasilyeva M. A. Express-diagnosis of the technical state slurry pumps in systems hydrotransport processing tails of ore // *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects.* 11th Conf. of the Russian-German Raw Materials, 2018. 2019. P. 273–282.

10. Шишлянников Д. И., Софьина Н. Н. Обоснование рационального способа контроля параметров работы и технического состояния штанговых скважинных насосных установок // *Известия вузов. Горный журнал.* 2016. № 4. С. 82–88.

11. Шишлянников Д. И., Зверев В. Ю., Лигинькова Я. С. Ингибиторная защита установок электроцентробежных насосов в условиях, осложненных отложениями солей и коррозией // *Горный журнал.* 2018. № 1. С. 90–98.

12. Лыкова Н. А., Щавалева А. В., Шишлянников Д. И. Оборудование для защиты установок электроцентробежных насосов от солеотложений и коррозии // *Горное оборудование и электромеханика.* 2017. № 7(134). С. 18–22.

13. Shishlyannikov D. I., Zverev V. Y., Ivanchenko A. A., Zvonarev I. E. Increasing the time between failures of electric submersible pumps for oil production with high content of mechanical impurities // *Applied Sciences (Switzerland).* 2022. Vol. 12. № 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.3390/app12010064>

14. Лыкова Н. А. Оборудование для работы УЭЦН в условиях интенсивного выноса механических примесей // *Инженерная практика.* 2017. № 3. С. 58–62.

15. Vasilyeva M. A. Modeling of wave processes when the heterogeneous flow is moving in a low-frequency magnetic peristaltic pump of pulsating type // *Vibroengineering Procedia.* 2019. № 25. P. 111–115.

16. Яковлев А. Л., Савенок О. В. Анализ эффективности применяемого оборудования и возможных причин отказа при интенсификации добычи нефти на месторождениях Краснодарского края // *ГИАБ.* 2016. № 5. С. 149–163.

17. Патент RU 2709580 C1 МПК E21B 43/08 (2006.01). Щелевой фильтр. № 2019128459; заявл. 10.09.2019; опублик. 18.12.2019. Бюл. № 35. 13 с.

Поступила в редакцию 6 декабря 2022 года

Сведения об авторах:

Коротков Юрий Григорьевич – аспирант кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: youshura@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0002-9465-5819>

Картавцев Вадим Кириллович – студент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: vadk10@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-5379-7726>

Сенькин Антон Викторович – начальник отдела горного проектирования ООО «ПроТех Инжиниринг». E-mail: anton.senkin@pte.eurochem.ru; <https://orcid.org/0009-0007-2910-6211>

Лунев Кирилл Александрович – студент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: kooiiuu@yandex.com; <https://orcid.org/0009-0003-8324-1554>

Колупаев Иван Евгеньевич – студент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета. E-mail: kol.i.evg@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0006-9079-6883>

Для цитирования: Коротков Ю. Г., Картавцев В. К., Сенькин А. В., Лунев К. А., Колупаев И. Е. Повышение наработки скважинных электроцентробежных насосов за счет применения самоочищающихся фильтров // *Известия вузов. Горный журнал.* 2023. № 3. С. 9–16 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-9-16

For citation: Korotkov Yu. G., Kartavtsev V. K., Senkin A. V., Lunev K. A., Kolupaev I. E. Increasing the operating time of electrical submersible pumps by using self-cleaning filters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2023; 3: 9–16. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-9-16

Определение максимального усилия поворота ковша гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой

Шемякин С. А.¹, Шишкин Е. А.^{1*}

¹ Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск, Россия

*e-mail: 004655@pnu.edu.ru

Реферат

Введение. На вскрышных и добычных работах в горном деле, а также в строительстве широко применяются одноковшовые экскаваторы как с гибкой, так и с жесткой подвеской рабочего оборудования. В строительстве чаще используют экскаваторы с жесткой подвеской рабочего оборудования, в горном деле – с гибкой и жесткой подвеской. В работе рассматривается процесс копания породы одноковшовым гидравлическим экскаватором, оборудованным обратной лопатой. Надежность и долговечность экскаваторов зависят от правильности выбора параметров элементов рабочего оборудования.

Цель работы. Исследование направлено на определение максимального усилия поворота ковша гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой, с учетом трения грунта о днище и боковые стенки ковша при разработке горной породы.

Методология. При аналитическом определении максимального усилия на штоках гидроцилиндров поворота ковша при копании породы целесообразно рассматривать формирование траншеи с ровной поверхностью или в карьере с ровной поверхностью забоя уступа при условии, что за один поворот ковша он заполняется полностью. При таком копании из массива вырезается сегмент породы, имеющий наибольшую толщину стружки по сравнению с другими способами копания. Максимальное сопротивление копанию будет включать: сопротивление, возникающее при резании породы ковшом с максимальной толщиной стружки; сопротивление, связанное с воздействием силы тяжести горной массы на ковш; сопротивление, связанное с трением горной массы о днище ковша; сопротивление, связанное с трением горной массы о внутренние поверхности боковых стенок ковша.

Результаты. Установлена зависимость максимального усилия на штоках гидроцилиндров поворота ковша от конструктивных параметров ковша, а также физико-механических характеристик породы забоя. Анализ полученных результатов выявил значительное влияние на суммарное сопротивление копанию ковшом экскаватора как технологической схемы копания, так и характеристик разрабатываемой горной породы.

Выводы. Разработанная методика определения сопротивления копанию учитывает внутренние силы взаимодействия ковша с горной породой и позволяет повысить точность определения максимального усилия копания. Появляется возможность более обоснованно подходить к выбору параметров гидроцилиндра поворота ковша экскаватора и за счет этого повысить надежность и долговечность машины в целом.

Ключевые слова: горная порода; гидравлический экскаватор; обратная лопата; трение грунта; вскрышные работы; добычные работы; усилие поворота ковша; сопротивление копанию; гидроцилиндр ковша; удельное сцепление.

Введение. В настоящее время наблюдается рост объемов добычи полезных ископаемых открытым способом, при котором в качестве выемочно-погрузочных машин используют одноковшовые экскаваторы как с гибкой, так и с жесткой подвеской рабочего оборудования [1, 2]. Особенно остро стоит вопрос о повышении надежности и долговечности экскаваторов, зависящих от правильного выбора

параметров рабочего оборудования. При расчете силовых элементов рабочего оборудования требуются значения максимальных нагрузок на эти элементы.

При определении максимальной нагрузки на рабочее оборудование гидравлических экскаваторов, оборудованных обратной лопатой, рассматривают два варианта копания [3, 4]. Первый вариант: копание поворотом рукояти при расположении ковша на выходе из забоя. Второй вариант: копание поворотом ковша на начальной стадии разработки забоя. Толщина стружки должна обеспечивать вырезание из породы за один поворот ковша объем V_c , равный вместимости ковша q (рис. 1). Увеличение толщины стружки сопровождается большим нагружением рабочего оборудования.

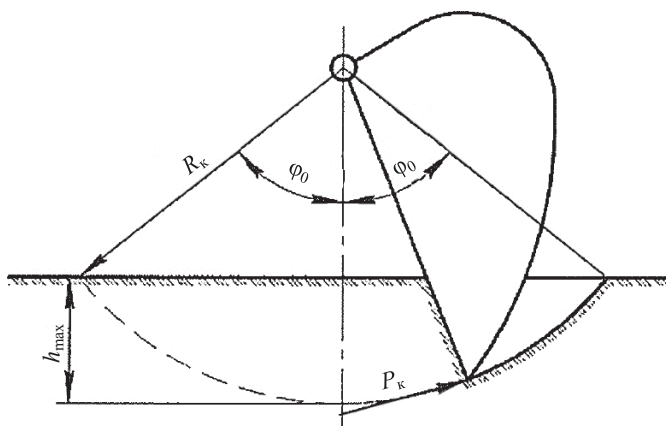


Рисунок 1. Схема разработки горной породы ковшом типа обратная лопата

Figure 1. Scheme of excavating the rock with a backhoe

Методика проведения исследований. Рассмотрим начальную стадию разработки забоя при копании поворотом ковша, при которой возникает наибольшая нагрузка на рабочее оборудование. Максимальную толщину стружки h_{\max} , м, получим из равенства вместимости ковша q , м³, и объема вырезаемой стружки V_c , м³:

$$h_{\max} = R_k (1 - \cos \varphi_0),$$

где R_k – радиус копания, м; φ_0 – угол поворота ковша, измеряемый от вертикальной плоскости, проходящей через ось вращения ковша, град.

Угол поворота ковша φ_0 определяется из выражения:

$$\varphi_0 = 2,81 \sqrt{\frac{2q \cdot 10^5}{1,295 B_k R_k^2}},$$

где B_k – ширина режущей кромки ковша, м.

Спротивление P_k , Н, возникающее при резании горной породы ковшом, можно определить по эмпирической зависимости [5]:

$$P_k = 9,81 C h_{\max}^{1,35} (1 + 2,6 B_k) (1 + 0,0075 \alpha_p) z, \quad (1)$$

где C – количество ударов ударника ДорНИИ [6]; α_p – угол резания, град; z – коэффициент положения зубьев на поверхности режущей кромки.

На значение коэффициента положения зубьев z влияет ширина режущей кромки ковша B_k и максимальная толщина стружки h_{max} . Известно, что рациональное значение отношения расстояния между соседними зубьями к их ширине составляет 2,5–3 [7]. Для соблюдения указанного соотношения значения коэффициента положения зубьев z должны соответствовать приведенным на рис. 2.

Ряд исследователей в области землеройной техники утверждают, что внутренние сопротивления в ковше экскаватора при копании незначительны и ими можно пренебречь [8]. Однако для преодоления сопротивления горной породы на начальной стадии разработки забоя (рис. 1) необходимо увеличить усилие на штоке гидравлического цилиндра поворота ковша в среднем на 7 % [9]. Горная порода, двигаясь по днищу и внутренним поверхностям боковых стенок ковша, оказывает давление на них, что приводит к возникновению сил трения. Пренебрежение внутренними сопротивлениями движению грунта в ковше на стадии проектирования землеройной техники может привести к снижению ее качественных показателей [10].

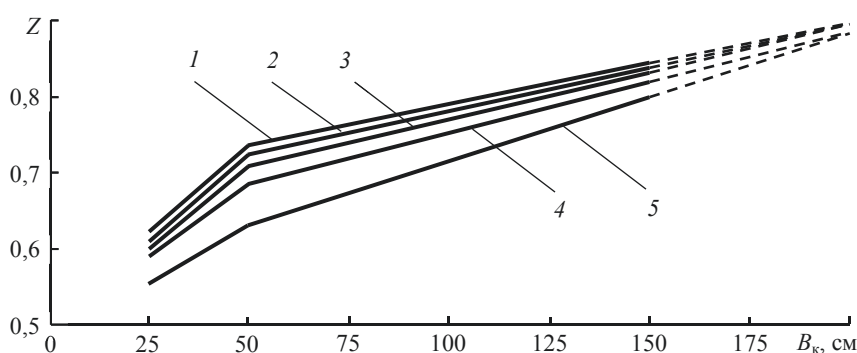


Рисунок 2. Конфигурация боковой стенки поворотного ковша при h_{max} : 1 – 5 см; 2 – 10 см; 3 – 15 см; 4 – 20 см; 5 – 23 см

Figure 2. Configuration of the side plate of the turning bucket, h_{max} : 1 – 5 cm; 2 – 10 cm; 3 – 15 cm; 4 – 20 cm; 5 – 23 cm

Таким образом, суммарное сопротивление ΣW , Н, копанию горной породы на начальной стадии разработки забоя можно определить по формуле

$$\Sigma W = P_k + S_k + S_d + S_6,$$

где S_k – сопротивление, связанное с воздействием силы тяжести горной массы на ковш, Н; S_d – сопротивление, связанное с трением горной массы о днище ковша, Н; S_6 – сопротивление, связанное с трением горной массы о внутренние поверхности боковых стенок ковша, Н.

Сопротивление S_k , связанное с воздействием силы тяжести горной массы на ковш, получим, исходя из условия наполнения половины объема ковша q :

$$S_k = \frac{q\gamma_r}{2} \sin \alpha_p, \tag{2}$$

где γ_r – удельная сила тяжести горной породы, Н/м³.

Аналогично получим выражение для определения сопротивления S_d , связанного с трением горной массы о днище ковша:

$$S_d = \frac{q\gamma_r\mu_1}{2} \sin \alpha_p, \quad (3)$$

где μ_1 – коэффициент трения горной породы о сталь.

Для определения сопротивления S_b , связанного с трением горной массы о внутренние поверхности боковых стенок ковша, воспользуемся положениями фундаментальной теории давления породы на стенку [11, 12].

В связи с достаточно простой конфигурацией с небольшим допущением можно принять стенки ковша экскаватора прямоугольной формы [13, 14] с площадью $R_k L$, где L – глубина ковша, м (рис. 3).

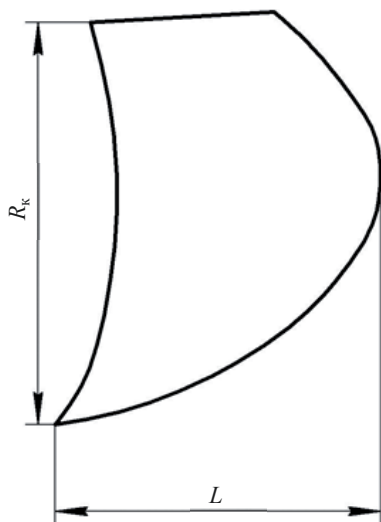


Рисунок 3. Конфигурация боковой стенки поворотного ковша
Figure 3. Configuration of the side plate of the turning bucket

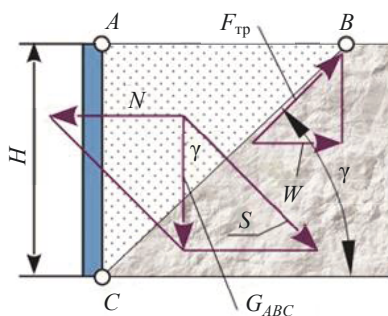


Рисунок 4. Схема сил, действующих на боковую стенку ковша экскаватора
Figure 4. Diagram of forces acting on the side plate of the excavator bucket

На рис. 4 приведена схема сил, действующих на объем горной массы, находящейся в ковше, а также на боковую стенку ковша экскаватора. Плоскость BC является границей раздела двух объемов породы, один из которых (ABC) оказывает нормальное давление N на боковую стенку ковша.

Так как объем ABC стремится распределиться по плоскости сдвига BC под углом естественного откоса γ , град, то нормальное давление N , Н, на стенку по правилу параллелограмма определяется следующим образом:

$$N = G_{ABC} \operatorname{tg} \gamma, \quad (4)$$

где G_{ABC} – сила тяжести призмы горной массы ABC , стремящейся к сдвигу, Н.

С учетом геометрии ковша сила тяжести призмы ABC :

$$G_{ABC} = \frac{L_{AB} H L \gamma_0}{2}, \quad (5)$$

где L_{AB} – ширина призмы горной массы ABC , м; L – глубина ковша, м; H – высота боковой стенки ковша, м; γ_0 – объемная сила тяжести горной породы, Н/м³.

Ортогонально плоскости BC действует сила S , Н, согласно рис. 4:

$$S = \frac{G_{ABC}}{\cos \gamma}. \quad (6)$$

В зоне контакта призмы ABC с остальной горной массой возникает сила трения $F_{\text{тр}}$, Н:

$$F_{\text{тр}} = Stg\varphi_2, \quad (7)$$

где $tg\varphi_2$ – коэффициент внутреннего трения горной породы.

Проекция силы трения на горизонтальную ось W , Н, согласно рис. 4:

$$W = F_{\text{тр}} \cos \gamma. \quad (8)$$

С учетом выражений (6), (7) уравнение (8) примет вид

$$W = G_{ABC} tg\varphi_2. \quad (9)$$

В случае разработки ковшом экскаватора связных горных пород величина бокового давления на стенки ковша будет меньше, чем для несвязных, за счет сил сцепления между минеральными частицами породы [15]. С учетом данного замечания давление на каждую боковую стенку ковша P , Н:

$$P = N - W - \frac{2C_n H}{\sin \gamma} Ltg\left(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}\right), \quad (10)$$

где C_n – сцепление горной породы, Н/м².

С учетом выражений (4), (9) уравнение (10) примет вид

$$P = G_{ABC} (tg\gamma - tg\varphi_2) - \frac{2CH}{\sin \gamma} Ltg\left(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}\right). \quad (11)$$

Принимая во внимание количество боковых стенок ковша сопротивление S_6 , связанное с трением горной массы о внутренние поверхности стенок:

$$S_6 = 2P\mu_1. \quad (12)$$

С учетом выражения (11) уравнение (12) примет вид:

$$S_6 = 2G_{ABC} (tg\gamma - tg\varphi_2)\mu_1 - \frac{4C_n H}{\sin \gamma} Ltg\left(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}\right)\mu_1. \quad (13)$$

Таким образом, суммарное сопротивление ΣW копанью горной породы на начальной стадии разработки забоя с учетом выражений (1), (2), (3), (5), (13) определяется зависимостью:

$$\begin{aligned} \Sigma W = & 9,81Ch_{\max}^{1,35} (1 + 2,6B_k) (1 + 0,0075\alpha_p) z + \frac{q\gamma_r}{2} \sin \alpha_p (1 + \mu_1) + \\ & + \mu_1 H \left[L_{AB} L_k \gamma_0 (tg\gamma - tg\varphi_2) - \frac{4C_n}{\sin \gamma} Ltg\left(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Первое слагаемое в формуле (14) представляет собой сопротивление резанию. Приняв вместимость ковша $q = 0,65 \text{ м}^3$, количество ударов ударника ДорНИИ $C = 16$ (грунт третьей категории), толщину стружки $h_{\max} = 40 \text{ см}$, ширину ковша $B_k = 1,1 \text{ м}$, угол резания $\alpha_p = 35^\circ$, коэффициент $z = 0,74$ согласно рис. 2, получим следующее значение сопротивления резанию:

$$P_k = 9,81 \cdot 16 \cdot 40^{1,35} (1 + 2,6 \cdot 1,1)(1 + 0,0075 \cdot 35) 0,74 = 32 \text{ 000 Н.}$$

Второе и третье слагаемые в формуле (14) составляют 4800 Н, суммарное сопротивление для заданных условий составит 36 800 Н. Таким образом, дополнительные сопротивления, связанные с трением породы о днище и боковые стенки ковша, составляют не менее 13,5 % от суммарного сопротивления и пренебрегать ими даже в предварительных расчетах нецелесообразно.

Результаты. Полученная зависимость устанавливает влияние конструктивных параметров ковша экскаватора, а также физико-механических характеристик породы забоя на суммарное сопротивление копанью горной породы.

Известно, что различные типы горных пород отличаются удельным сцеплением между частицами, а также силой трения между зёрнами [16, 17]. Полученная зависимость (14) позволяет установить влияние типа породы на суммарное сопротивление копанью.

Выводы. Разработанная методика определения сопротивления копанью учитывает внутренние силы взаимодействия ковша с горной породой и позволяет повысить точность определения максимального усилия копания. Появляется возможность более обоснованно подходить к выбору параметров гидроцилиндра поворота ковша экскаватора и за счет этого повысить надежность и долговечность машины в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова П. В., Асонов С. А., Иванов С. Л., Кувшинкин С. Ю. Анализ структуры и надежности современного парка карьерных экскаваторов // ГИАБ. 2017. № 7. С. 51–57.
2. Логинов Е. В. Особенности применения гидравлических экскаваторов типа обратная лопата // Научный журнал. 2016. № 6(7). С. 152–154.
3. Доценко А. И., Карасев Г. Н., Кустарев Г. В. Машины для земляных работ. М.: Бастет, 2012. 687 с.
4. Васьюк В. С., Таугер В. М. Оценка методов расчета нагрузок на рабочее оборудование карьерных экскаваторов // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18205> (дата обращения: 17.04.2023)
5. Зеленин А. Н., Баловнев В. И., Керов И. П. Машины для земляных работ. М.: Машиностроение, 1975. 422 с.
6. Белов П. А. О физическом смысле числа С ударника ДорНИИ // Строительные и дорожные машины. 2012. № 10. С. 45–47.
7. Бурый Г. Г., Щербаков В. С., Потеряев И. К. Сравнительный анализ сил сопротивления копанью, действующих на серийный ковш экскаватора и ковш цилиндрической формы // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 4(89). С. 11–20. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-4-11-20
8. Домбровский Н. Г., Панкратов С. А. Землеройные машины. М.: Госстройиздат, 1961. 651 с.
9. Шестаков В. С., Колесников П. А. Особенности расчета усилий копания и нагрузок на элементы рабочего оборудования гидравлических экскаваторов // Известия УГТУ. 2012. № 27-28. С. 95–100.
10. Suryo S., Bayuseno A., Jamari J., Wahyudi A. Analysis of rake angle effect to stress distribution on excavator bucket teeth using finite element method // Civil Engineering Journal. 2018. Vol. 3. No. 12. P. 1222–1234. DOI: 10.28991/cej-030952
11. Зурнаджи В. А., Николаев В. В. Механика грунтов, основания и фундаменты. М.: Высш. школа, 1967. 416 с.
12. Ren Z., Li J., Pang X., Liu J., Li T., Yu S. Research on the matching characteristics of the theoretical digging force of a backhoe hydraulic excavator // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Art. 16181. DOI: 10.1038/s41598-022-19976-x
13. Бурый Г. Г., Щербаков В. С., Скобелев С. Б., Ковалевский В. Ф. Совершенствование конструкции ковша гидравлического экскаватора // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2019. Т. 16. № 3(67). С. 202–213.
14. Sun H., Ren Z., Wang J., Wei W., Liang Yo., Feng M. Integrated expression and general optimization method of bucket shape line of backhoe hydraulic excavator // Journal of Mechanical Science and Technology. 2021. Vol. 35. P. 2543–2550. DOI: 10.1007/s12206-021-0525-0

15. Sun H., Ren Z., Liang Y., He Y., Feng M. Strength analysis of excavator bucket based on normal digging trajectory and limiting digging force // Journal of Vibroengineering. 2020. Vol. 23(1). P. 217–226. DOI: 10.21595/jve.2020.21596

16. Lin G., Feng G., Zhizhen Z., Yan X. Research on the energy evolution characteristics and the failure intensity of rocks // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30(5). P. 705–713. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.06.006

17. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Концепция квазихрупкого разрушения горных пород применительно к процессам их добычи и переработки // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 4. С. 64–75. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-4-64-75

Поступила в редакцию 28 января 2023 года

Сведения об авторах:

Шемякин Станислав Аркадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических систем в строительстве и горном деле Тихоокеанского государственного университета. E-mail: 000403@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3238-0840>

Шишкин Евгений Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры транспортно-технологических систем в строительстве и горном деле Тихоокеанского государственного университета. E-mail: 004655@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-17-24

Determining the maximum turning force of the hydraulic backhoe excavator bucket

Stanislav A. Shemiakin¹, Evgenii A. Shishkin¹

¹ Pacific National University, Khabarovsk, Russia.

Abstract

Introduction. Single-bucket excavators with both flexible and rigid suspension of work equipment are actively engaged in construction, stripping work and production mining. Excavators with rigid suspension are commonly used in construction, while excavators with flexible suspension are used in mining practice. This work considers the process of excavating rock with a single-bucket hydraulic backhoe excavator. The reliability and durability of excavators depend on the correct choice of the parameters of work equipment elements.

Research objective is to determine the maximum turning force of the bucket of a hydraulic backhoe excavator; taking into account soil friction against the bucket bottom and side plates during rock excavation.

Methods of research. When the maximum force on the bucket turning hydraulic-cylinder rods in the course of rock excavation is analytically defined, it is advisable to consider digging a trench in plain surface or in the open-pit in plain surface of a slope face provided that per one turn the bucket is filled to capacity. In this case, a segment of soil cut from the rock mass has maximum depth of cut as compared to other excavation methods. Total excavation resistance includes: resistance arising from cutting rock with a bucket with maximum depth of cut; resistance associated with the impact of gravity of the rock mass on the bucket; resistance associated with rock mass friction against the bucket bottom; resistance associated with rock mass friction against the inner surfaces of the bucket side plates.

Results. The dependence has been determined between the maximum force on the bucket turning hydraulic-cylinder rods and bucket design parameters as well as the physical and mechanical characteristics of the face rock. The results analysis showed that both excavation process flow scheme and rock characteristics have a significant influence on the total bucket excavation resistance.

Conclusions. The developed method of calculating the excavation resistance takes into account the internal forces of bucket interaction with rock and makes it possible to increase the accuracy of maximum digging force calculation. It therefore becomes possible to more reasonably approach the choice of the excavator bucket turning hydraulic cylinder parameters and thereby increase the reliability and durability of the machine as a whole.

Keywords: rock; hydraulic excavator; backhoe; soil friction; stripping work; production mining; bucket turning force; excavation resistance; bucket hydraulic cylinder; specific cohesion.

REFERENCES

1. Ivanova P. V., Asonov S. A., Ivanov S. L., Kuvshinkin S. Iu. Analysis of structure and reliability of modern fleet of mine shovels. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 7: 51–57. (In Russ.)
2. Loginov E. V. Application features of hydraulic excavators of the reverse shovel type. *Nauchnyi zhurnal = Scientific Journal*. 2016; 6(7): 152–154. (In Russ.)
3. Dotsenko A. I., Karasev G. N., Kustarev G. V. *Machines for earthworks*. Moscow: Bastet Publishing; 2012. (In Russ.)
4. Vaskov V. S., Tauger V. M. Evaluation of methods for calculating loads on the work equipment of mining shovels. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia = Modern Problems of Science and Education*. 2015; 1-1: 153. (In Russ.) Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=18205> [Accessed 17 April 2023].
5. Zelenin A. N., Balovnev V. I., Kerov I. P. *Machines for earthworks*. Moscow: Mashinostroenie Publishing; 1975. (In Russ.)
6. Belov P. A. About the physical meaning of the number C of the DorNII ram tester. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny = Construction and Road Building Machinery*. 2012; 10: 45–47. (In Russ.)
7. Buryi G. G., Shcherbakov V. S., Poteriaev I. K. Comparative analysis of resisting to digging forces effecting stock bucket of excavator and cylindrical bucket. *Vestnik Brianskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2020; 4(89): 11–20. (In Russ.)
8. Dombrovskii N. G., Pankratov S. A. *Earthmoving machines*. Moscow: Gosstroizdat Publishing; 1961. (In Russ.)
9. Shestakov V. S., Kolesnikov P. A. Specific features of calculation of digging efforts and loads onto elements of working equipment of hydraulic excavators. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = Proceedings of the Ural State Mining University*. 2012; 27-28: 95–100. (In Russ.)
10. Suryo S., Bayuseno A., Jamari J., Wahyudi A. Analysis of rake angle effect to stress distribution on excavator bucket teeth using finite element method. *Civil Engineering Journal*. 2018; 3(12): 1222. Available from: doi: 10.28991/cej-030952
11. Zurnadzi V. A., Nikolaev V. V. *Soil mechanics, foundations and foundations*. Moscow: Vyssh. shkola Publishing; 1967. (In Russ.)
12. Ren Z., Li J., Pang X., Liu J., Li T., Yu S. Research on the matching characteristics of the theoretical digging force of a backhoe hydraulic excavator. *Scientific Reports*. 2022; 12: 16181. Available from: doi: 10.1038/s41598-022-19976-x
13. Buryi G. G., Shcherbakov V. S., Skobelev S. B., Kovalevskii V. F. Improvement of the hydraulic excavator bucket design. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta = The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2019; 16, 3(67): 202–213. (In Russ.)
14. Sun H., Ren Z., Wang J., Wei W., Liang Yo., Feng M. Integrated expression and general optimization method of bucket shape line of backhoe hydraulic excavator. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021; 35: 2543. Available from: doi: 10.1007/s12206-021-0525-0
15. Sun H., Ren Z., Liang Y., He Y., Feng M. Strength analysis of excavator bucket based on normal digging trajectory and limiting digging force. *Journal of Vibroengineering*. 2020; 23(1): 217–226. Available from: doi: 10.21595/jve.2020.21596
16. Lin G., Feng G., Zhizhen Z., Yan X. Research on the energy evolution characteristics and the failure intensity of rocks. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020; 30(5): 705–713. Available from: doi: 10.1016/j.ijmst.2020.06.006
17. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. The concept of quasi-brittle rock fracture as applied to extraction and processing operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 4: 64–75. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-4-64-75

Received 28 January 2023

Information about the authors:

Stanislav A. Shemiakin – DSc (Engineering), Professor of the Department of Transport and Technological Systems in Construction and Mining, Pacific National University. E-mail: 000403@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-3238-0840>

Evgenii A. Shishkin – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Transport and Technological Systems in Construction and Mining, Pacific National University. E-mail: 004655@pnu.edu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4387-0228>

Для цитирования: Шемякин С. А., Шишкин Е. А. Определение максимального усилия поворота ковша гидравлического экскаватора, оборудованного обратной лопатой // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 17–24. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-17-24

For citation: Shemiakin S. A., Shishkin E. A. Determining the maximum turning force of the hydraulic backhoe excavator bucket. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 17–24 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-17-24

Конструкция и определение основных параметров струнного ступенчатого грохота

Демченко И. И.¹, Игнатова О. С.^{1*}

¹ Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

*e-mail: ignatova.ol@mail.ru

Реферат

Введение. Получение энергии – важнейшая проблема человечества. Угольная генерация решала и в обозримом будущем будет решать эту проблему благодаря обширной ресурсной базе и относительно стабильной и невысокой стоимости сырья. При этом эффективность работы генерирующих предприятий зависит от качества поставляемого топлива. Для генерирующих предприятий и коммунально-бытового сектора, использующих слоевой способ сжигания топлива, весьма важно использование сортового угля, повышающего эффективность их работы. Получение сортового угля, т. е. разделение его по классам крупности, осуществляется гравитационными грохотами, к достоинствам которых можно отнести простоту конструкции и отсутствие привода при осуществлении операции сортировки. К недостаткам – невысокое качество при рассортировке. Поэтому создание новых конструкций гравитационных грохотов и совершенствование существующих для повышения качества сортировки имеют большое значение.

Методика проведения исследования. В Сибирском федеральном университете разработана конструкция струнного ступенчатого грохота, использующего гравитационный способ разделения сортируемого материала по классам крупности. Для внедрения данной разработки в промышленность весьма важно знать основные конструктивные параметры, заложенные в предлагаемой конструкции. В статье предложена математическая модель расчета параметров струнного ступенчатого грохота и результаты расчета габаритов грохота в зависимости от других меняющихся параметров. Выполнены математическое моделирование (построение математической модели расчета) и анализ конструкции струнного ступенчатого грохота для определения его основных параметров.

Результат исследования. Представлена конструкция струнного ступенчатого грохота. Разработана математическая модель расчета основных параметров и построены графики зависимости изменения габаритов грохота от других меняющихся значений. Выполнен анализ конструкции струнного ступенчатого грохота, определены его основные параметры.

Вывод. На основе проведенного исследования построена математическая модель расчета параметров струнного ступенчатого грохота и построены зависимости длины, высоты от углов наклона передней стенки и просеивающих секций. Полученные зависимости позволяют определить параметры струнного ступенчатого грохота для заданных значений крупности просеиваемого материала.

Ключевые слова: грохот; габариты; просеивающие секции; угол наклона; кантователи; бункер; горная масса.

Введение. Задача обеспечения энергией – одна из самых важных для всех отраслей промышленности. Угольная генерация, благодаря относительно невысокой стоимости и устойчивости цен по сравнению с природным газом и нефтью, а также обширной ресурсной базе, позволяет ее решить. При этом уголь является самым распространенным теплоэнергетическим ресурсом в мире и по объемам

превосходит все остальные виды ископаемого топлива, что в долгосрочной перспективе делает его самым дешевым и востребованным [1–6].

Добываемый рядовой уголь перед отправкой потребителям, практикующим слоевое сжигание топлива, необходимо переработать, так как сжигание рядового угля не столь эффективно, как сортового. Для сортировки, т. е. разделения угля на фракции по крупности, применяют различные типы грохотов, которые являются незаменимым оборудованием на обогатительных фабриках, а также входят в состав дробильно-сортировочных комплексов на горнодобывающих предприятиях [7–13].

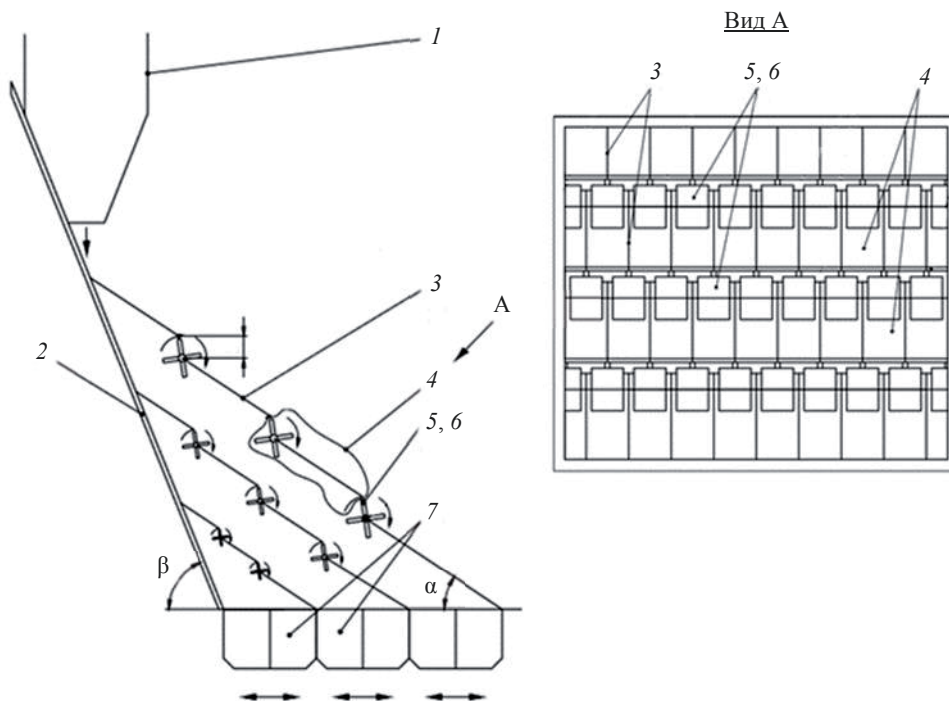


Рисунок 1. Струнный ступенчатый грохот: 1 – загрузочный бункер; 2 – передняя стенка; 3 – просеивающая поверхность; 4 – ступень (h_c – высота ступени); 5 – кантователь; 6 – лопатки кантователя; 7 – приемные бункеры; α – угол наклона просеивающих поверхностей; β – угол наклона передней стенки

Figure 1. String stepped screen: 1 – feed; 2 – front wall; 3 – screen deck; 4 – step (h_c – the height of the step); 5 – cantilever; 6 – cantilever blades; 7 – receiving hopper; α – screen angles; β – front wall angles

В настоящее время при рассортировке угля по классам крупности применяют различные виды грохотов, простейшими из которых являются грохоты, использующие гравитационный способ разделения, к которым можно отнести струнные и колосниковые конструкции.

В Сибирском федеральном университете разработан струнный ступенчатый грохот (ССГ) для сортировки угля, защищенный патентом России [14], отличающийся конструктивной простотой и использующий гравитацию при разделении горной массы на классы крупности, что не требует привода (рис. 1).

В предлагаемой конструкции качество сортировки повышается путем применения ступенчатого расположения просеивающих поверхностей, отсеивающих

Таблица 1. Минимальные расчетные параметры приемных бункеров и просеивающих секций струнного ступенчатого грохота*

Table 1. Minimum design parameters of receiving hoppers and screening sections of string stepped screen*

Класс крупности (размер куска, м)	Длина приемного бункера $L_{п.б.}$, м	Высота приемного бункера $H_{п.б.}$, м	Длина просеивающей секции $L_{пр.с.}$, м	Ширина просеивающей секции $B_{пр.с.}$ (ширина грохота B), м
Штыб (0,006)	0,4	0,03	0,78	Принимается равной ширине загрузочного бункера в зависимости от марки автосамосвала
Семечко (0,013)	0,6	0,06	2,00	
Мелкий (0,025)	0,8	0,11	3,63	
Орех (0,05)	1,1	0,23	5,95	
Крупный кулак (0,1)	1,3	0,45	8,95	
Плитный (0,3)	2,0	1,35	14,10	

* Приведенные минимальные расчетные значения параметров ССГ могут меняться в зависимости от потребностей заказчика (условий сортировки, установки грохота и предварительной обработки горной массы).

Таблица 2. Минимальная длина лопатки кантователя и высота ступени на просеивающих секциях № 2–6 для разных фракций a

Table 2. Minimum length of the cantilever blade and the height of the step on screening sections no. 2–6 for different fractions a

Показатель	$a = 13$ мм № 2	$a = 25$ мм № 3	$a = 50$ мм № 4	$a = 100$ мм № 5	$a = 300$ мм № 6
Минимальная длина лопатки кантователя $l_{л.}$, мм	12	20	40	80	180
Высота ступени h_c , мм	25	45	90	180	480

Таблица 3. Длина струнного ступенчатого грохота

Table 3. Length of string stepped screen

Количество просеивающих секций струнного грохота снизу вверх (размер получаемой фракции)	Высота от верха приемных бункеров до крепления просеивающих секций H_{1-6} , м	Угол наклона передней стенки β , град							
		50	55	60	65	70	75	80	85
		Длина струнного ступенчатого грохота L , м							
1 (6 мм)	0,61	0,9	0,8	0,75	0,7	0,6	0,56	0,5	0,45
2 (13 мм)	1,57	2,3	2,1	1,9	1,7	1,6	1,4	1,3	1,1
3 (25 мм)	2,85	4,2	3,8	3,4	3,1	2,8	2,6	2,3	2,1
4 (50 мм)	4,67	6,8	6,2	5,6	5,1	4,6	4,2	3,7	3,3
5 (100 мм)	7,03	10,1	9,1	8,3	7,5	6,8	6,1	5,4	4,8
6 (300 мм)	11,08	15,5	13,9	12,6	11,4	10,2	9,2	8,2	7,2

один класс крупности, причем струны просеивающих поверхностей 3 располагаются в шахматном порядке относительно друг друга. В конце каждой ступени 4 (кроме самой нижней, перед приемным бункером 7) по пути движения сортируемого угля предлагается установить кантователи 5, задача которых переворачивать попадающие на них куски горной массы и укладывать их на следующую ступень

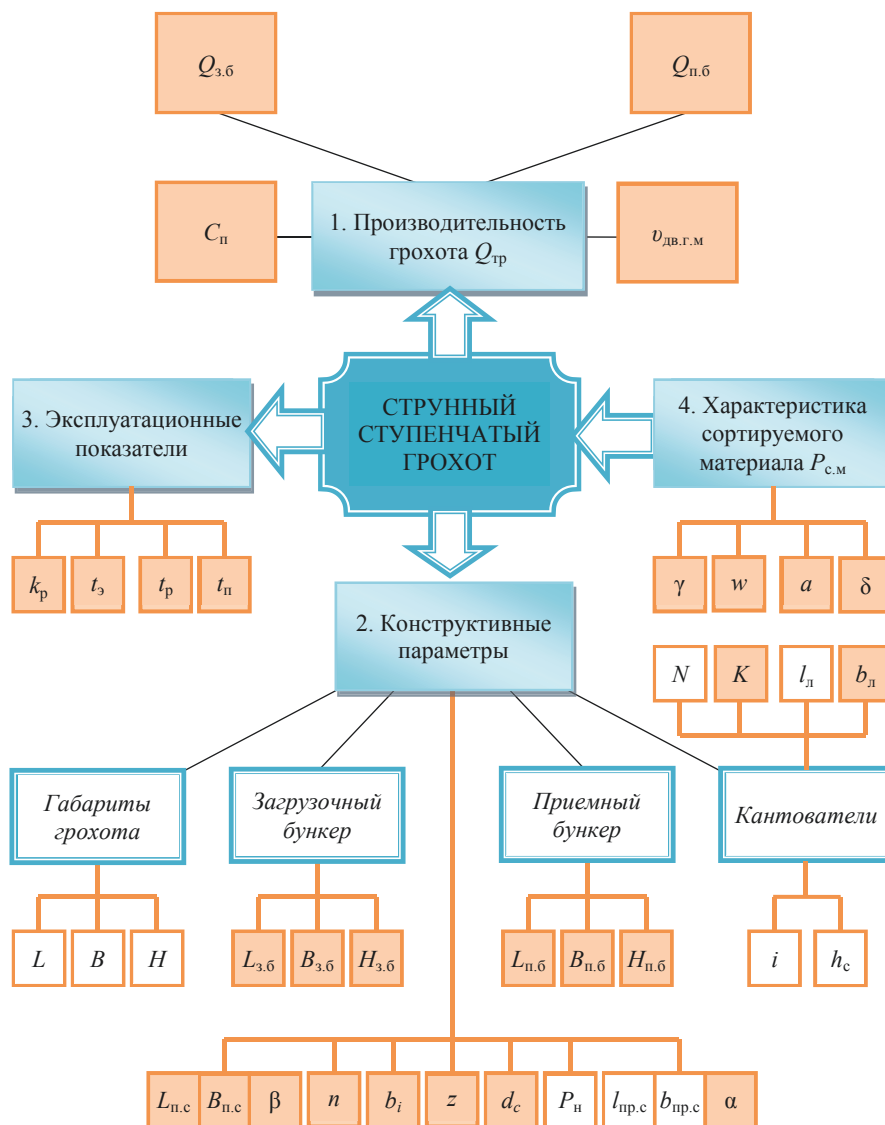


Рисунок 2. Схема параметров и факторов, влияющих на работу струнного ступенчатого грохота

Figure 2. Scheme of parameters and factors affecting the operation of a string stepped screen

просеивающей поверхности, струны которой имеют шахматное расположение относительно предыдущей. Передняя стенка 2, установленная с большим углом наклона β относительно просеивающих поверхностей, служит для набора усилия, необходимого для движения кусочков угля по просеивающим поверхностям и вращения кантователей. В качестве струн может быть использован пруток или канат соответствующего сечения.

При проектировании струнного ступенчатого грохота с требуемой производительностью проанализированы его рабочие процессы. В результате анализа выбраны и обоснованы его конструктивные и режимные параметры.

Комплекс параметров и факторов, влияющих на них, представлен в виде схемы на рис. 2, где $Q_{\text{тр}}$ – требуемая производительность, $\text{м}^3/\text{ч}$; $Q_{3,6}$, $Q_{\text{п.б}}$ – пропускные способности загрузочного и приемных бункеров, $\text{м}^3/\text{ч}$; $C_{\text{п}}$ – способ подачи сортируемого материала (равномерный или неравномерный грузопоток, в рассматриваемом грохоте применяется равномерная подача сортируемого материала); $v_{\text{дв.г.м}}$ – скорость движения горной массы по рабочей поверхности грохота, $\text{м}/\text{с}$; $P_{\text{с.м}}$ – характеристика сортируемого материала (γ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; w – влажность, %; a – гранулометрический состав, мм ; δ – абразивность, мг); $k_{\text{р}}$ – коэффициент работы грохота, учитывающий сменность работы; $t_{\text{э}}$ – время эксплуатации, ч ; $t_{\text{р}}$ – время, затрачиваемое на ремонт, ч ; $t_{\text{п}}$ – время простоев, ч ; L , B , H – длина, ширина и высота грохота соответственно, мм ; $L_{3,6}$, $L_{\text{п.б}}$ – длина загрузочного и приемных бункеров, мм ; $B_{3,6}$, $B_{\text{п.б}}$ – ширина загрузочного и приемных бункеров, мм ; $H_{3,6}$, $H_{\text{п.б}}$ – высота загрузочного и приемных бункеров, мм ; N – количество рядов кантователей на просеивающей секции, на единицу меньше числа ступеней, шт; n – количество просеивающих секций, шт; i – количество ступеней на просеивающей секции, шт; $h_{\text{с}}$ – высота ступени, мм ; K – количество лопаток кантователя, шт; $l_{\text{л}}$ – длина лопатки кантователя, мм ; $b_{\text{л}}$ – ширина лопатки кантователя, мм ; $L_{\text{п.с}}$, $B_{\text{п.с}}$ – длина и ширина передней стенки соответственно, мм ; α – угол наклона просеивающей секции, град; b_i – расстояние между струнами, мм ; z – количество струн (канатов) на просеивающей секции, шт; $d_{\text{с}}$ – диаметр струн (канатов), мм ; $P_{\text{н}}$ – натяжное усилие струн (канатов) на каждом участке (ступени), Н ; $l_{\text{пр.с}}$, $b_{\text{пр.с}}$ – длина и ширина просеивающей секции соответственно, мм ; β – угол наклона передней стенки, град.

Методика проведения исследования. Определение габаритных параметров струнного ступенчатого грохота включает в себя расчет его длины, высоты и ширины.

Ширина струнного ступенчатого грохота B определяется исходя из ширины загрузочного бункера, которая зависит от марки применяемого автосамосвала или ширины бункера, если перед сортировкой уголь или другой материал проходит дробление.

Уголь классифицируют: штыб 0–6 мм (1 секция); семечко 6–13 мм (2 секция); мелкий 13–25 мм (3 секция); орех 25–50 мм (4 секция); крупный кулак 50–100 мм (5 секция); плитный 100–300 мм (6 секция).

Длина и высота струнного ступенчатого грохота зависят от длины и высоты передней стенки, длины и количества составляющих грохот просеивающих секций, от углов установки наклонной стенки и просеивающих секций, а также от количества ступеней на каждой просеивающей секции.

Передняя стенка предлагаемого грохота служит для набора необходимого движущего усилия для вращения кантователей и предотвращения или уменьшения раскалывания кусков угля.

Рассчитаем движущее усилие, необходимое для движения кусков просеиваемого материала по просеивающей секции и вращения кантователей:

$$F = mg(\sin\beta - k_{\text{тр.н.с}}\cos\beta),$$

где m – масса куска угля, скатывающегося по наклонной стенке на просеивающую секцию, кг ; g – ускорение, набранное куском угля на наклонной стенке, $\text{м}/\text{с}^2$; $k_{\text{тр.н.с}}$ – коэффициент трения угля по стали наклонной стенки.

Длина передней стенки определится исходя из количества просеивающих секций, от нее будет зависеть величина силы, которую необходимо набрать куску угля для осуществления вращения кантователя.

Угол установки передней стенки β , влияющий на скорость движения сортируемого материала, должен регулироваться по типу просеивающего материала и в зависимости от его свойств.

Пределы изменения угла наклона $\beta = 50^\circ\text{--}85^\circ$. При необходимости увеличения скорости движения материала по канатному полю угол наклона передней стенки необходимо увеличить или уменьшить, если требуется снижение скорости.

Таблица 4. Высота струнного ступенчатого грохота
Table 4. Height of string stepped screen

Количество просеивающих секций струнного грохота снизу вверх (размер получаемой фракции)	Угол наклона передней стенки β , град.							
	50	55	60	65	70	75	80	85
	Высота струнного ступенчатого грохота H , м							
1 (6 мм)	2,98	2,93	2,88	2,85	2,82	2,79	2,76	2,73
2 (13 мм)	4,23	4,15	3,99	3,92	3,85	3,80	3,75	3,71
3 (25 мм)	5,88	5,78	5,47	5,37	5,23	5,15	5,08	5,03
4 (50 мм)	8,35	8,00	7,69	7,49	7,28	7,17	7,02	6,98
5 (100 мм)	11,57	11,02	10,51	10,21	9,90	9,79	9,57	9,50
6 (300 мм)	17,62	16,72	15,91	15,41	15,0	14,71	14,55	14,37

Таким образом, длина передней стенки определится исходя из скорости истечения материала, а также в зависимости от угла наклона передней стенки:

$$L_{н.с} = \frac{v^2}{2g\sin\beta},$$

где v – скорость истечения материала, м/с.

Зная длину передней стенки, определим ее высоту:

$$H_{н.с} = L_{н.с}\sin\beta.$$

Определяемыми параметрами просеивающих секций являются длина, ширина, расстояние между просеивающими секциями по высоте, количество ступеней на каждой просеивающей секции и их высота.

Для расчета длин просеивающих секций грохота зададим количество ступеней i на каждой просеивающей секции (сверху вниз): секция № 6 – 3 ступени; № 5 – 3 ступени; № 4 – 2 ступени; № 3 – 2 ступени; № 2 – 1 ступень; № 1 – без ступени.

Таким образом, длина просеивающей секции № 1 (снизу вверх) струнного ступенчатого грохота:

$$L_{1п.с} = \frac{L_{н.с.1}\sin(180^\circ - \beta)}{\sin(180^\circ - (180^\circ - \beta) - \alpha)}.$$

Тогда длины просеивающих секций № 2, 3, 4, 5 и 6 определяются по формуле:

$$L_{\text{пр.с}} = \frac{(L_{\text{н.б.1}} + L_{\text{н.б.2}} + \dots + L_{\text{н.б.n}}) \sin(180^\circ - \beta)}{\sin(180^\circ - (180^\circ - \beta) - \alpha)} + i\sqrt{h_c^2 + l_c^2},$$

где $L_{\text{н.б.1}} - L_{\text{н.б.n}}$ – длины приемных бункеров, м (табл. 1); l_c – длина ступени, м.

При этом высоту ступени h_c определим исходя из размеров кантователя (длины лопатки кантователя на определенной просеивающей секции l_n , мм) и фракции сортируемого материала a , мм, получаемой на определенной просеивающей секции:

$$h_c = l_n + a.$$

Результаты расчета параметров ступеней приведены в табл. 2.

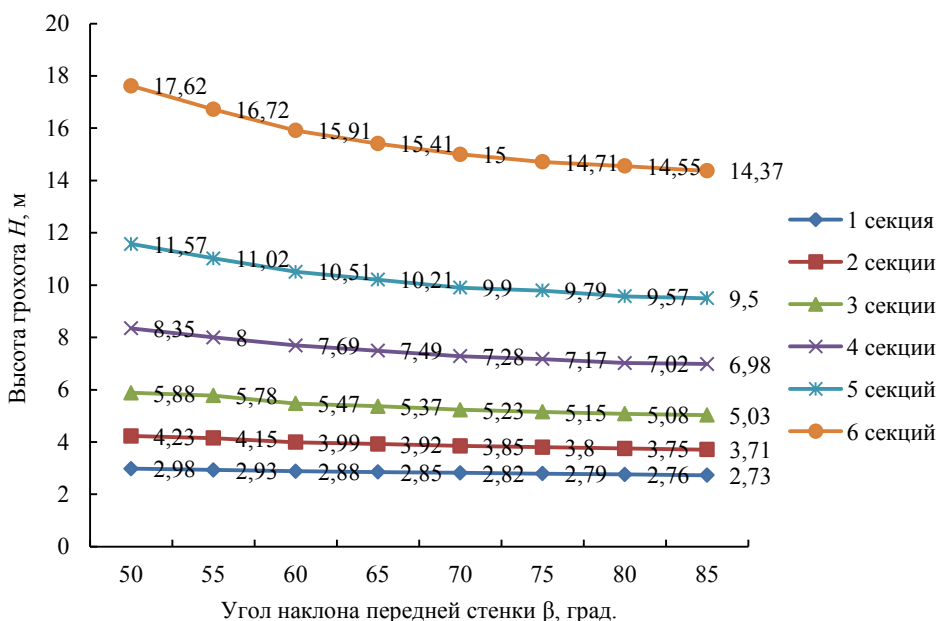


Рисунок 3. Зависимость высоты струнного ступенчатого грохота от количества просеивающих секций и угла наклона передней стенки струнного грохота
 Figure 3. Dependence of the string stepped screen height on the number of screening sections and the front wall angle

Выбор формы кантователей рассмотрен в [15]. Так как работа кантователей заключается во вращении, а их форма симметрична, то:

$$h_c \geq l_c.$$

Количество ступеней определится эффективностью сортировки и исходя из конструктивных особенностей струнного ступенчатого грохота.

Результаты расчетов длин просеивающих секций струнного ступенчатого грохота при изменении углов наклона передней стенки и просеивающей секции приведены в табл. 2.

Рассчитаем длину грохота с учетом изменения угла наклона передней стенки с шагом в 5° и количеством просеивающих секций:

$$L = \left((L_{п.6.1} + L_{п.6.2} + L_{п.6.3} + \dots L_{п.6.n}) + \frac{H_{1-6}}{\text{tg}\beta} \right) + L_{3,6},$$

где $L_{п.6.1} - L_{п.6.n}$ – длины приемных бункеров (табл. 2), м; H_{1-6} – высота от верха приемных бункеров до крепления просеивающих секций (секции с № 1 по № 6), м; β – угол наклона передней стенки (50°– 85°); $L_{3,6}$ – длина загрузочного бункера (в случае его расположения не над просеивающей поверхностью грохота), м.

Таблица 5. Производительность струнного ступенчатого грохота (ширина просеивающей секции $B_{пр.с} = 2-11$ м, для расчета принято 3 м)

Table 5. Performance of string stepped screen (screening section width $B_{пр.с} = 2-11$ m, 3 m is accepted for calculation)

Параметр грохота	Количество просеивающих секций, установленных на грохоте (в зависимости от получаемой фракции)					
	1 (6 мм)	2 (13 мм)	3 (25 мм)	4 (50 мм)	5 (100 мм)	6 (300 мм)
Длина просеивающей секции $L_{пр.с}$, м	0,78	2,0	3,63	5,95	8,95	14,1
Площадь просеивающей поверхности F , м ²	2,3	6,0	10,9	17,9	26,9	42,3
Удельная производительность грохота q , т/(ч · м ²).	30	45	60	75	90	120
Производительность грохота Q_r , т/ч	69	270	654	1343	2421	5076

Полученные результаты приведены в табл. 3.

Высоту струнного ступенчатого грохота определяем:

$$H = H_{п.6} + H_{1-6} + H_{п.с} + H_{3,6}, \tag{1}$$

где $H_{п.6}$ – высота приемных бункеров; H_{1-6} – высота от верха приемных бункеров до места крепления просеивающих секций; $H_{п.с}$ – высота наклонной передней стенки грохота; $H_{3,6}$ – высота загрузочного бункера.

Рассчитаем высоту струнного ступенчатого грохота по формуле (1) с учетом изменения количества просеивающих секций грохота, угла наклона передней стенки ($\beta = 50^\circ - 80^\circ$) и изменения высоты приемных бункеров. Результаты приведены в табл. 4.

Графическая зависимость высоты струнного ступенчатого грохота от количества просеивающих секций и угла наклона передней стенки представлена на рис. 3.

Рассмотрим зависимость габаритов просеивающих секций струнного ступенчатого грохота в зависимости от их производительности.

Производительность неподвижного струнного ступенчатого грохота определяется (Инструкция по расчету производственных мощностей действующих предприятий по добыче и переработке угля (сланца). Министерство топлива и энергетики Российской Федерации (Приказ от 15 июля 1993 г. № 164)):

$$Q_r = Fq,$$

где F – площадь просеивающей поверхности грохота, м²; q – удельная производительность грохота (зависит от ширины щели грохота), т/(ч · м²).

Площадь просеивающей поверхности грохотов:

$$F = L_{\text{пр.с}} B_{\text{пр.с}},$$

где $L_{\text{пр.с}}$ – длина просеивающих секций грохота № 1–№ 6 (табл. 2), м; $B_{\text{пр.с}}$ – ширина просеивающих секций грохота № 1–№ 6, м.

Конструкция струнного ступенчатого грохота предполагает рассортировку угля одновременно на параллельно установленных просеивающих секциях, поэтому зависимость производительности от габаритов ведется по наибольшей получаемой фракции (просеивающая секция 6).

Результаты расчета производительности струнного ступенчатого грохота приведены в табл. 5.

Выводы. Предложена конструкция струнного ступенчатого грохота. Построена математическая модель расчета основных параметров струнного ступенчатого грохота. Проведен расчет параметров, присущих струнному ступенчатому грохоту, – длины и ширины просеивающих секций, а также его габаритов – длины, ширины и высоты. Построены зависимости длины и высоты ССГ от количества просеивающих секций и угла наклона передней стенки.

Определена зависимость производительности струнного ступенчатого грохота от габаритов его просеивающих секций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черкасова Т. Г., Тихомирова А. В., Черкасова Е. В. Уголь – сырье для наукоемких отраслей промышленности // Уголь. 2022. № S12. С. 67–71.
2. Таразанов И. Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь–сентябрь 2021 года // Уголь. 2022. № 1. С. 47–58.
3. Плакиткин Ю. А., Плакиткина Л. С., Дьяченко К. И. Уголь как основа большого цивилизационного «скачка» и новых возможностей мирового развития // Уголь. 2022. № 8. С. 77–83.
4. Coal Information 2020. Overview. International Energy Agency Statistics, OECD/IEA, 2021. 28 p.
5. Statistics report Key World Energy Statistics. International Energy Agency Statistics, OECD/IEA, September 2021. 80 p.
6. Астафьева О. Е. Формирование механизма устойчивого развития угольной промышленности // Уголь. 2021. № 3. С. 10–13.
7. Губанов Р. С. Способы, динамика и структура угледобычи на российских месторождениях: проблемы и решения // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 5. С. 25–35.
8. Rong Zhang. New insights into the permeability-increasing area of overlying coal seams disturbed by the mining of coal // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2018. No. 1. P. 352–364.
9. Lin J., Kahrl F., Liu X. A regional analysis of excess capacity in China's power systems // Resources, Conservation and Recycling. 2018. Vol. 129. P. 93–101.
10. Панков Д. А., Афанасьев В. Я. Добыча и потребление угля в мире: перспективы для российских экспортеров // Уголь. 2020. № 11. С. 67–70.
11. Демченко И. И., Муленкова А. О. О возможности размещения перерабатывающего оборудования в забое разреза для получения сортового угля // Известия вузов. Горный журнал. 2017. № 8. С. 26–32.
12. Fathi Salmi E. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence // Engineering Geology. 2017. No. 1. P. 141–152.
13. Jiuping Xu. Ecological coal mining based dynamic equilibrium strategy to reduce pollution emissions and energy consumption // Journal of Cleaner Production. 2017. No. 11. P. 514–529.
14. Струнный грохот. МПК В07В 1/12; пат. Рос. Федерация. № 2692395; заявл. 09.10.2018; опубл. 24.06.2019. Бюл. № 18. 7 с.
15. Демченко И. И., Игнатова О. С. Обоснование параметров струнного грохота // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 7. С. 31–37.

Сведения об авторах:

Демченко Игорь Иванович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и комплексов Сибирского федерального университета. E-mail: demtchenkoi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-5103-4773>

Игнатова Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры горных машины и комплексов Сибирского федерального университета. E-mail: ignatova.ol@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2870-3966>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-25-35

String stepped screen design and main parameters

Igor I. Demchenko¹, Olga S. Ignatova¹¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.**Abstract**

Introduction. Obtaining energy is the most important problem of mankind. Coal-fired generation has solved, and will solve this problem in the foreseeable future due to its extensive resource base and relatively stable and low price. At the same time, the efficiency of the generating enterprises depends on the quality of the fuel supplied. For generating enterprises and domestic household using a layered method of burning fuel, it is very important to use high-grade coal, which increases the efficiency of their work. Obtaining high-grade coal, i.e. its separation by size classes is carried out by gravity screens. The advantages of the gravity screens are simple design and the absence of a drive during the sorting operation. Low sorting quality is the disadvantage. Therefore, the creation of new gravity screen designs and the development of existing ones to improve the sorting quality is of great importance.

Methods of research. The Siberian Federal University has developed a design of a string stepped screen which uses a gravitational method of sorted material separation by size classes. To introduce it to industry, it is important to know the basic design parameters inherent in the proposed design. The article offers a mathematical model for calculating string stepped screen parameters and presents the results of calculating screen dimensions depending on other changing parameters. Mathematical modeling (construction of a mathematical calculation model) and analysis for string stepped screen design have been carried out to determine its basic parameters.

Research results. A string stepped screen design is presented. A mathematical model for basic parameters calculation has been developed. Graphs have been constructed showing the dependence of the changing screen dimensions on other changing values. The string stepped screen design has been analysed.

Conclusion. Based on the conducted research, a mathematical model for string stepped screen parameters calculation is constructed. The dependences of length and height on the front wall and screening section angles are constructed. The obtained dependences will allow to determine the string stepped screen parameters for the specified values of the screened material size.

Keywords: screen; dimensions; screening sections; hopper; angle; cantilevers; hopper; rock mass.

REFERENCES

1. Cherkasova T. G., Tikhomirova A. V., Cherkasova E. V. Coal as a raw material for knowledge-intensive industries. *Ugol = Coal*. 2022; S12: 67–71. (In Russ.)
2. Tarazanov I. G. Russia's coal industry performance for January–September, 2021. *Ugol = Coal*. 2022; 1: 47–58. (In Russ.)
3. Plakitkin Iu. A., Plakitkina L. S., Diachenko K. I. Coal as the basis of a great civilization leap and new opportunities for world development. *Ugol = Coal*. 2022; 8: 77–83. (In Russ.)
4. *Coal Information 2020. Overview*. International Energy Agency Statistics, OECD/IEA, 2021.
5. *Statistics report Key World Energy Statistics*. International Energy Agency Statistics, OECD/IEA, September 2021.
6. Astafieva O. E. Formation of the mechanism of sustainable development of the coal industry. *Ugol = Coal*. 2021; 3: 10–13. (In Russ.)
7. Gubanov R. S. Methods, dynamics and structure of coal mining in Russian deposits: problems and solutions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 5: 25–35. (In Russ.)

8. Rong Zhang. New insights into the permeability-increasing area of over-lying coal seams disturbed by the mining of coal. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2018; 1: 352–364.
9. Lin J., Kahrl F., Liu X. A regional analysis of excess capacity in China's power systems. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018; 129: 93–101.
10. Pankov D. A., Afanasiev V. Ia. Global coal production and consumption: prospects for Russian exporters. *Ugol = Coal*. 2020; 11: 67–70. (In Russ.)
11. Demchenko I. I., Mulenkova A. O. Concerning the possibility of placing the processing equipment in the face of an open pit to obtain sized coal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2017; 8: 26–32. (In Russ.)
12. E. Fathi Salmi. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence. *Engineering Geology*. 2017; 1: 141–152.
13. Jiuping Xu. Ecological coal mining based dynamic equilibrium strategy to reduce pollution emissions and energy consumption. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 11: 514–529.
14. Demchenko I. I., Ignatova O. S., Plotnikov I. I. *String screen*. RF Patent no. 2692395; 2019. (In Russ.)
15. Demchenko I. I., Ignatova O. S. Justification of string rumble parameters. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics*. 2016; 7: 31–37. (In Russ.)

Received 14 March 2023

Information about the authors:

Igor I. Demchenko – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Mining Machines and Complexes Department, Siberian Federal University. E-mail: demtchenkoi@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0009-5103-4773>

Olga S. Ignatova – senior lecturer, Mining Machines and Complexes Department, Siberian Federal University. E-mail: ignatova.ol@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-2870-3966>

Для цитирования: Демченко И. И., Игнатова О. С. Конструкция и определение основных параметров струнного ступенчатого грохота // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 25–35. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-25-35

For citation: Demchenko I. I., Ignatova O. S. String stepped screen design and main parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 25–35 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-25-35

ГЕОМЕХАНИКА. РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-36-42

Frost-resistant emulsion explosives

Viktor S. Gorinov¹

¹ NPP ArgoSintez, Stroitel town, Belgorod region, Russia

e-mail: mr.gorinman@yandex.com

Abstract

Introduction. The paper considers the development of a frost-resistant emulsion explosive (EE) to create cartridges, including the ones with a small diameter.

Research objective is to develop a frost-resistant cap-sensitive EE to create cartridges, including the ones with a small diameter; to increase the reliability, efficiency, and safety of blasting operations in the northern and Arctic regions.

Methods of research are based on EE frost resistance theoretical analysis and laboratory study, as well as ground tests on detonation velocity and completeness in the developed EE.

Results. It is shown that EE with an oxidizing phase based on a binary solution of ammonium and calcium nitrate with calcium chloride under a particular water content and with a fuel phase based on the DEP-1 emulsifier solution in a wide range of petroleum products meets the requirements of frost resistance. The resulting EE in a practically relevant temperature range (–60...+40 °C) represents an elastoplastic body that makes it possible to form durable cartridges that retain geometry. The socket for the detonator capsule is easily made anywhere in the cartridge using aluminum piercel or drill of the wood twist drill type. EE reliably detonates from the detonator capsule of the non-electric detonation system (SINV). The detonation velocity in open cartridges 32 mm in diameter is 4700–5000 m/s.

Conclusions. The results obtained in the article justify the development of EE compositions suitable for patronized explosives for the northern and Arctic regions.

Keywords: northern regions; Arctic regions; emulsion explosive; crystalline hydrates; frost resistance; cartridge EE.

Relevance. Russian mineral resource base is expanded by large-scale development of rich solid mineral deposits in hard-to-reach and uninhabited areas of the Polar Urals, Eastern Siberia and the Far East. Up to 40% of gold reserves and almost 100% of primary diamond deposits are in the Russia's Arctic zone alone [1]. The extraction of materials and the inevitable construction of buildings, structures, roads, airfields, ports, etc. require higher consumption of industrial explosives. It is therefore absolutely essential to develop technologies for efficient blasting in severe climatic and complex mining and geological conditions.

The basis of any blasting technology is the explosive.

Emulsion explosives (EE) have recently got widespread in Russian mining industry [2]. However, severe climatic conditions and deposits remoteness made some researchers assume that, when developing Russia's northern and Arctic regions, it is advisable to focus on simplest explosives and their application technologies instead of focusing on emulsion explosives [1–6]. The following statements support this argument [1]:

- emulsion explosives production in the conditions of the North of Russia is unprofitable due to the high cost of energy;
- regular explosives are not practical due to expensive logistics and lack of high-capacity storage facilities for explosives in remote regions.

However, mass transition to the simplest explosives in Russia's northern and Arctic regions is hampered by the following factors:

- the solubility of ammonium nitrate, the main mass component of the simplest explosives, which greatly complicates blasting in unfrozen and watered ground (rocks);
- the demand for cartridge water-resistant and frost-resistant explosives caused by the prevalence of shallow-hole blasting in the extraction of valuable non-ferrous metal ore, as well as in the underwater and coastal blasting operations and ice blockage removal.

It should be noted that the development of EE production and application technology has shown the possibility of their effective use for ore extraction in remote deposits located in severe climatic conditions. It turned out that it is possible to produce matrix emulsion at a considerable distance from the places where EE are used, and it can be delivered there in corrugated cardboard containers [7]. Along with the developed methods of cold emulsion sensitization [7, 8], it allows to use EE at some remote deposits located in the north-east of the country.

However, the demonstrated achievements keep from omitting regular cartridge explosives. Therefore, the development of a frost-resistant EE to create cartridges, including the ones with a small diameter, is an urgent task for the northern and Arctic regions development.

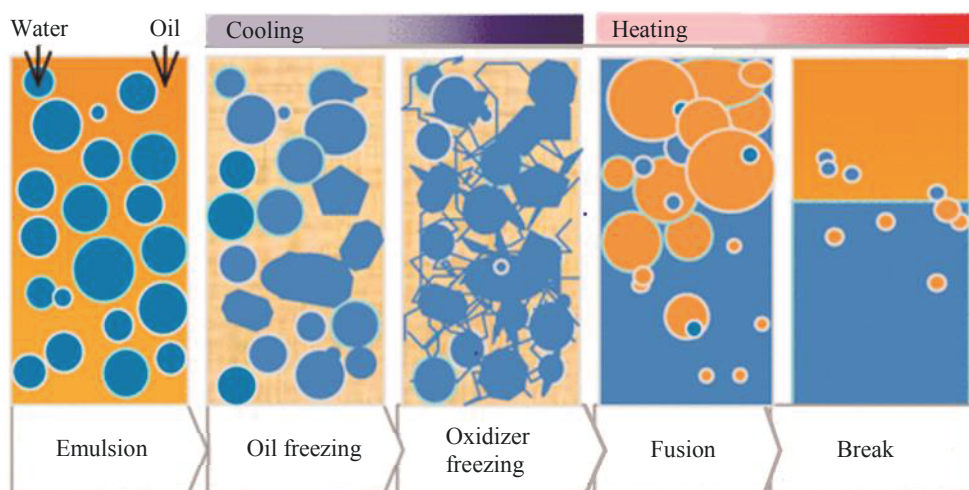


Figure 1. Inverse emulsion break under the “freeze–thaw” processes [9]

Рисунок 1. Разрушение обратной эмульсии при процессах «замерзание–оттаивание» [9]

Research results. EE for Arctic conditions should be thermal cycling resistant. An analysis of research on inverse emulsion resistance to “freeze–thaw” processes shows that emulsion is resistant if its fuel phase does not freeze until water freezes in droplets of the oxidizing phase [9–15].

Figure 1 shows the processes that occur when the emulsion freezes. If the fuel phase is the first to freeze, it will be damaged by the subsequently freezing oxidizing phase expansion. As a result, a certain amount of the liquid oxidizing phase is drawn into the small cracks of the frozen fuel phase. These processes result in emulsion break in the course of thawing, inevitably leading to the loss of EE detonability.

To solve this problem, it is proposed to use EE with an oxidizing phase based on a binary solution of ammonium and calcium nitrate.

It is known that calcium nitrate forms several stable and unstable crystalline hydrates. Stable calcium nitrate crystalline hydrates exist within the following temperature ranges [16]:

- under $51.1\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t$ stable hydrates are not formed;
- under $42.7\text{ }^{\circ}\text{C} \leq t \leq 51.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ calcium nitrate trihydrate is formed;
- under $t \leq 42.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ calcium nitrate tetrahydrate is formed,

where t is the emulsion temperature, $^{\circ}\text{C}$.

So, under the emulsion temperature below $51.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, water in EE is combined into calcium nitrate trihydrate, and into calcium nitrate tetrahydrate under the emulsion temperature below $42.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, which leads to a reduced content of free water in EE. Decreased free water content reduces the probability of damaging the oil film that envelops the emulsion oxidizing phase particles, when the oil film is cooled down below the freezing point of the oxidizing phase due to the increased volume of these particles.

In Arctic conditions it is proposed to use the EE the matrix emulsion of which has a composition characterized by the dependence between the water content in the emulsion and the content of calcium nitrate and calcium chloride:

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \mu_{\text{H}_2\text{O}} \left(\frac{N_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} M_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2}}{\mu_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2}} + \frac{N_{\text{CaCl}_2} M_{\text{CaCl}_2}}{\mu_{\text{CaCl}_2}} \right), \quad (1)$$

where $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18$; $\mu_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} = 164$; $\mu_{\text{CaCl}_2} = 111$ are the molecular masses of water, calcium nitrate, and calcium chloride, respectively, g/mol; $N_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2}$, N_{CaCl_2} is the number of water molecules in the hydrate combined with the molecule of the hydrate-forming substance; $M_{\text{H}_2\text{O}}$, $M_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2}$, M_{CaCl_2} are the fractions of water, calcium nitrate and calcium chloride in the emulsion, respectively, wt%.

If condition (1) is fulfilled, under emulsion cooling, water will be in a crystalline hydrate state only. It will provide the emulsion with substantial resistance to “freeze–thaw” processes. It can be shown that the maximum possible amount of water in the emulsion, which can be in the crystalline state at temperatures below $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, is reached under $N_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} = 4$; $N_{\text{CaCl}_2} = 4$. However, for reliable formation of crystalline hydrates, it is advisable to reduce the amount of water in the emulsion oxidizing phase, therefore, to calculate the amount of water in the emulsion, the following was assumed: $N_{\text{Ca}(\text{NO}_3)_2} = 3$ and $N_{\text{CaCl}_2} = 4$.

So, substituting numerical values into equation (1), we get:

$$[\text{H}_2\text{O}] = 0,3293[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2] + 0,6486[\text{CaCl}_2], \quad (2)$$

where $[\text{H}_2\text{O}]$, $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$, $[\text{CaCl}_2]$ is the content of water, calcium nitrate and calcium chloride in the emulsion matrix, respectively, wt%.

The use of calcium chloride is due to its ability to form crystalline hydrates [17]:

- at temperatures below $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, calcium chloride dihydrate, which exists at temperatures above $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, turns into a tetrahydrate;
- at temperature below $29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ it turns into the hexahydrate.

This allows to combine in hydrates a certain amount of water that entered the reactor in excess of the calculated amount. Calcium chloride also makes it possible to expand the acceptance region for the content of calcium nitrate, at which it is possible to synthesize effective EE that do not have free water in the emulsion at temperatures below $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The proposed composition of EE contains only 8.0–10.0% wt% of water. It can cause rapid crystallization of the supersaturated saline solution in the emulsion. Experiments

have shown that resistance to crystallization is reliable if 20% solution of the DEP-1 polymer dispersant-emulsifier is used as the fuel phase in petroleum products.

DEP-1 (TU 20.41.20-002-73592474-2022 [18]) is a polymeric surfactant based on amine derivatives of polyisobutylene succinic anhydride (PIBSA).

The proposed compositions were prepared as follows: sample weights of calcium nitrate and calcium chloride were dissolved in the estimated amount of water at a temperature of 120 °C. After that, the required amount of ammonium nitrate was added to the solution and the temperature was raised to 90–95 °C, the solution was continuously stirred. In a different container, the fuel phase of the emulsion matrix was obtained by preparing a 20% solution of the DEP-1 emulsifier in mineral oil at a temperature of 50–60°C. Oxidizer solution was continuously added into the resulting fuel phase under rapid stirring (1500–2000 rpm). The mixing time was 90–120 s. The ratio of the oxidizing and fuel phases of these compositions was selected to ensure an oxygen balance close to zero.

Table 1. Emulsion explosive compositions for northern and Arctic regions and their detonation properties under complete detonation of EE

Таблица 1. Составы эмульсионного взрывчатого вещества для применения в северных и арктических регионах и их детонационные свойства при полной детонации ЭВВ

Component	Composition number, wt%				
	1	2	3	4	5
Ammonium nitrate	53.2	60.1	64.39	62.5	58.85
Calcium nitrate	28.4	20.0	16.41	17.6	25.0
Calcium chloride	1.0	3.7	4.0	4.0	0.25
Fuel phase: DEP-1 emulsifier + industrial oil	7.4	7.2	7.2	7.5	7.5
Water	10.0	9.0	8.0	8.4	8.4
EE density, g/cm ³	1.177	1.166	1.161	1.161	1.171
Detonation velocity, m/c	4670–4900	4670–4920	4740–5040	4750–5030	4780–5070

The detonation properties were determined by the completeness of detonation of an open charge 32 mm in diameter when it was initiated by the detonator capsule of the non-electric detonation system (SINV). Additionally, the detonation velocity was measured in polyethylene pipes with an inner diameter of 40 mm. Sensitization was carried out with glass microspheres about 80 µm in diameter. Emulsion particles size was 2.5 µm.

Information on EE compositions and test results is given in Table 1. Experiments demonstrated that the proposed EE compositions can be obtained using various liquid hydrocarbons (diesel fuel, industrial mineral oils I-10, I-20, I-40 and their mixtures).

The resulting EE in a relevant temperature range (–60...+40 °C) represents an elastoplastic body that makes it possible to form durable cartridges that retain geometry. The socket for the detonator capsule is easily made anywhere in the cartridge using aluminum piercel or drill of the wood twist drill type.

Further increase in the content of calcium nitrate and a decrease in the amount of water results in reduced emulsion stability, which is technologically and economically impractical.

Conclusions. Blasting technology analysis shows that the development of frost-resistant EE for cartridges, including the ones with a small diameter, is an urgent task.

The present research shows that EE with an oxidizing phase based on a binary solution of ammonium and calcium nitrate with the addition of calcium chloride under a water content of $[H_2O] = 0,3293[Ca(NO_3)_2] + 0,6486[CaCl_2]$ and with a fuel phase from the DEP-1 emulsifier solution in a wide range of petroleum products $[H_2O]$, $[Ca(NO_3)_2]$, $[CaCl_2]$ meets the requirements.

The resulting EE in a relevant temperature range ($-60...+40$ °C) represents an elastoplastic body that makes it possible to form durable cartridges that retain geometry. The socket for the detonator capsule is easily made anywhere in the cartridge using aluminum piercer or drill of the wood twist drill type.

EE reliably detonates from the detonator capsule of the non-electric detonation system (SINV). The detonation velocity in open cartridges 32 mm in diameter is 4700–5000 m/s.

REFERENCES

1. Tikhonov V. A., Dudnik G. A., Panfilov S. Iu., Zhulikov V. V. Features of blasting operations in the development of mineral resources of the northern and Arctic regions of Russia. *Gorniaia promyshlennost' = Mining Industry*. 2021; 2: 102–106. (In Russ.)
2. Sosnin V. A., Mezheritskii S. E. The state and prospects of development of industrial explosives in Russia and abroad. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*. 2016; 19(19): 84–89. (In Russ.)
3. Viktorov S. D., Frantov A. E. The choice of efficiency criteria and methods for assessing the simplest explosives for the northern and Arctic regions of Russia. In: *Problems and prospects of integrated development and conservation of the Earth's interior: Proceedings of the 4th International Scientific School of RAS Academician K. N. Trubetskoi. Moscow, November 16–20, 2020*. p. 67–71. (In Russ.)
4. Viktorov S. D., Frantov A. E., Lapikov I. N. Trends for improvement of cheap explosives for the northern and Arctic areas of Russia. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2020; 6(110): 41–44. (In Russ.)
5. Viktorov S. D., Frantov A. E., Lapikov I. N., Rakhmanov R. A., Suvorov Iu. I., Kantor V. Kh., Fadeev V. Iu., Tikhonov V. N., Radkov V. V., Zhulikov V. V. Development of innovative technologies for conducting blasting operations using the simplest explosive granulates in the development of mineral resources of the northern and Arctic regions of Russia. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 2020; 129/86: 116–146. (In Russ.)
6. Viktorov S. D., Frantov A. E., Opanasenko P. I., Strogii I. B., Zharikov I. F., Lapikov I. N. Innovative ways for improving the cheap explosives using additives made from returned to production recycled materials. *Ugol = Coal*. 2020; 11(1136): 17–21. (In Russ.)
7. Kutuzov B. N., Maslov I. Iu., Bragin P. A., Bolshakov V. V., Semin A. S. Production of emulsion explosive materials as PVV-A-70 emulan for Olekminskiy mine on the base of low-temperature emulsion. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2011; 8: 91–93. (In Russ.)
8. Natarov O. V. *Improving the technology of blasting with the use of emulsion explosives in the quarries of the Khibiny deposits: PhD in Eng. diss.* Apatity; 2006.
9. Chang Lin, Gaohong He, Chunxu Dong, Hongjing Liu, Gongkui Xiao, YuanFa Liu. Effect of oil phase transition on freeze/thaw-induced demulsification of water-in-oil emulsions. *Langmuir*: 2008; May 20; 24(10): 5291–8. Available from: doi: 10.1021/la704079s
10. Ghosh S., Rousseau D. Freeze-thaw stability of water-in-oil emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009; 339(1): 91–102. Available from: doi:10.1016/j.jcis.2009.07.047
11. Rojas E. C., Papadopoulos K. D. Induction of instability in water-in-oil-in-water double emulsions by freeze-thaw cycling. *Langmuir*. 2007; 23(13): 6911–7. Available from: doi: 10.1021/la063533f
12. Capek I. Degradation of kinetically-stable o/w emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2004; 107(2-3): 125–155. Available from: doi: 10.1016/S0001-8686(03)00115-5
13. Bechiri O., Ismail F., Abbessi M., El Hadi Samar M. J. Stability of the emulsion (W/O): application to the extraction of a Dawson type heteropolyanion complex in aqueous solution. *Hazard Mater*. 2008; 152(3): 895–902. Available from: doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.067
14. Tadros T. *Polymeric surfactants in disperse systems*. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009; 147–148: 281–299. Available from: doi: 10.1016/j.cis.2008.10.005
15. Gorinov S. A., Kuprin R. V. Patent RF no. 2755069C1. *Emulsion explosive for sulfide-containing rocks*; 2021.
16. Pozin M. E. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids). Part II*. Leningrad: Khimiia Publishing; 1974. p. 792–1556.
17. Pozin M. E. *Technology of mineral salts (fertilizers, pesticides, industrial salts, oxides and acids). Part I*. Leningrad: Khimiia Publishing; 1974. p. 791.
18. Kuprin V. P., Savchenko N. V., Kovalenko I. L., Kuprin A. V., Kuprin R. V., Selin I. Iu. Patent RF no. 2652714C1 *Universal emulsifier of reverse emulsions*; 2017.

Information about the author:

Viktor S. Gorinov – consultant, NPP ArgoSintez. E-mail: mr.gorinman@yandex.com; <https://orcid.org/0000-0002-9928-1003>

УДК 622.235.24

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-36-42

Морозоустойчивые эмульсионные взрывчатые вещества**Горинов В. С.¹**¹ НПП «АргоСинтез», г. Строитель, Белгородская обл., Россия.**Реферат**

Введение. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой морозоустойчивого эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) для создания патронов, в том числе и малого диаметра.

Цель работы. Разработать морозоустойчивое капсулечувствительное ЭВВ для создания патронов, в том числе малого диаметра, для повышения надежности, эффективности и безопасности взрывных работ в северных и арктических регионах.

Методология. В основу методики исследований положены теоретический анализ и лабораторное изучение морозостойкости ЭВВ, а также полигонные опыты по изучению полноты и скорости детонации.

Результаты. Показано, что требованиям морозоустойчивости удовлетворяет ЭВВ с окислительной фазой на основе бинарного раствора аммиачной и кальциевой селитры с добавкой хлористого кальция при определенном содержании воды и с топливной фазой из раствора эмульгатора «ДЭП-1» в широком спектре нефтепродуктов. Получаемое ЭВВ в практически значимом диапазоне температур (–60...+40 °С) представляет собой упруго-пластичное тело, позволяющее формировать прочные, сохраняющие свои геометрические размеры патроны. Гнездо для размещения капсуля-детонатора легко делается в любом месте патрона при помощи алюминиевого шила или сверла типа «спиральное для древесины». ЭВВ надежно детонирует от капсуля-детонатора СИИВ (неэлектрическая система инициирования взрыва). Скорость детонации в открытых патронах диаметром 32 мм составляет 4700–5000 м/с.

Выводы. Полученные в статье результаты служат основанием для разработки составов ЭВВ, пригодных для создания патронированных взрывчатых веществ для северных и арктических регионов.

Ключевые слова: северные регионы; арктические регионы; эмульсионное взрывчатое вещество; кристаллогидраты; морозостойкость; патронированное ЭВВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихонов В. А., Дудник Г. А., Панфилов С. Ю., Жуликов В. В. Особенности ведения взрывных работ при освоении минеральных ресурсов северных и арктических регионов России // Горная промышленность. 2021. № 2. С. 102–106.
2. Соснин В. А., Межеричкий С. Э. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 19. С. 84–89.
3. Викторов С. Д., Франтов А. Е. Выбор критериев эффективности и методов оценки простейших ВВ для северных и арктических районов России // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: тр. 4-й Междунар. науч. школы акад. РАН К. Н. Трубецкого. Москва, 16–20 ноября 2020 г. С. 67–71.
4. Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н. Направления совершенствования простейших ВВ для северных и арктических районов России // Маркшейдерия и недропользование. 2020. № 6(110). С. 41–44.
5. Викторов С. Д., Франтов А. Е., Лапиков И. Н., Рахманов Р. А., Суворов Ю. И., Кантор В. Х., Фадеев В. Ю., Тихонов В. Н., Радьков В. В., Жуликов В. В. Развитие инновационных технологий ведения взрывных работ с применением простейших ВВ-гранулитов при освоении минеральных ресурсов северных и арктических районов России // Взрывное дело. 2020. № 129/86. С. 116–146.
6. Викторов С. Д., Франтов А. Е., Опанасенко П. И., Строгий И. Б., Жариков И. Ф., Лапиков И. Н. Инновационные направления совершенствования простейших ВВ с добавками, возвращаемыми в производственный оборот рециклингом материалов // Уголь. 2020. № 11(1136). С. 17–21.

7. Кутузов Б. Н., Маслов И. Ю., Брагин П. А., Большаков В. В., Семин А. С. Производство эмульсионного ВВ эмулан ПВВ-А-70 для ООО «Олекминский рудник» на основе низкотемпературной эмульсии // Горный журнал. 2011. № 8. С. 91–93.

8. Натаров О. В. Совершенствование технологии взрывных работ с применением эмульсионных взрывчатых веществ на карьерах Хибинских месторождений: дисс. ... канд. техн. наук. Апатиты. 2006. 113 с.

9. Chang Lin, Gaohong He, Chunxu Dong, Hongjing Liu, Gongkui Xiao, YuanFa Liu. Effect of oil phase transition on freeze/thaw-induced demulsification of water-in-oil emulsions // Langmuir. 2008. May 20. No. 24(10). P. 5291-8. DOI: 10.1021/la704079s

10. Ghosh S., Rousseau D. Freeze-thaw stability of water-in-oil emulsions // Journal of Colloid and Interface Science. 2009. No. 339(1). P. 91–102. DOI:10.1016/j.jcis.2009.07.047

11. Rojas E. C., Papadopoulos K. D. Induction of instability in water-in-oil-in-water double emulsions by freeze-thaw cycling // Langmuir. 2007. No. 23(13). P. 6911-7. DOI: 10.1021/la063533f

12. Capek I. Degradation of kinetically-stable o/w emulsions // Advances in Colloid and Interface Science. 2004. No. 107(2-3). P. 125–155. DOI: 10.1016/S0001-8686(03)00115-5

13. Bechiri O., Ismail F., Abbessi M., El Hadi Samar M. J. Stability of the emulsion (W/O): application to the extraction of a Dawson type heteropolyanion complex in aqueous solution // Hazard Mater. 2008. No. 152(3). P. 895–902. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.11.067

14. Tadros T. Polymeric surfactants in disperse systems // Advances in Colloid and Interface Science. 2009. No. 147–148. P. 281–299. DOI: 10.1016/j.cis.2008.10.005

15. Эмульсионное взрывчатое вещество для сульфидсодержащих горных пород: пат. RU 2755069C1 Рос. Федерация. № 2021101415; заявл. 22.01.2021; опубл. 13.09.2021. Бюл. № 26. 13 с.

16. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч. II. Л.: Химия, 1974. С. 792–1556.

17. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч. I. Л.: Химия, 1974. 791 с.

18. Универсальный эмульгатор обратных эмульсий: пат. RU 2652714C1 Рос. Федерация. № 2017125618; заявл. 17.07.2017; опубл. 28.04.2018. Бюл. № 13. 10 с.

Поступила в редакцию 21 января 2023 года

Сведения об авторе:

Горинов Виктор Сергеевич – консультант НПП «АргоСинтез». E-mail: mr.gorinman@yandex.com; <https://orcid.org/0000-0002-9928-1003>

Для цитирования: Горинов В. С. Морозоустойчивые эмульсионные взрывчатые вещества // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 36–42 (In Eng.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-36-42

For citation: Gorinov V. S. Frost-resistant emulsion explosives. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 36–42. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-36-42

Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования схемы расчета разрушения горных пород шпуровым способом

Першин Г. Д.¹, Пшеничная Е. Г.^{1*}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Россия

*e-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

Реферат

Введение. Шпуровой способ добычи и подготовки горных пород к выемке применялся человеком с древних времен, однако общепринятых и общепризнанных проектно-расчетных методов данного процесса до настоящего времени не существует, что было установлено в обзорной части данной работы.

Целью работы является разработка базовой расчетной модели разрушения квазихрупких материалов крепких горных пород шпуровым способом с помощью статических распорных средств.

Методология. Методическую основу разработанной квазистатической модели расчета энергосиловых показателей процесса разделения объемов (кусков) горной породы на отдельные части составляет детальное рассмотрение механизма разрушения через переходное состояние от сплошности материала породы к его разделению, что дает возможность обосновать и определить: необратимо затраченную удельную работу разрыва через энергетическую константу материала горной породы во взаимосвязи с энергетическим КПД процесса; критическую нагрузку, приводящую к локальному разрушению; величину зародышевых трещин разрыва и их количество, а также количество сквозных трещин.

Результат. Полученные показатели и параметры составили основное содержание уравнения энергетического баланса необратимо затраченной работы разрыва объемов горной породы. Разработанная методология постановки и решения задачи предельного состояния разрыва квазихрупких материалов в виде толстостенного цилиндра (задача Ляме), моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным шпуровым давлением распорных средств, является универсальной и может служить в качестве базовой для оценки комплекса вопросов, связанных с горным производством. Полученная взаимосвязь показателей позволила составить уравнение энергетического баланса разрыва объемов горной породы с решением которого впервые были получены: критическое значение шпурового давления, приводящего к локальному разрушению; величина зародышевых трещин и соответствующее им предельное разрывающее давление.

Теоретическая новизна. В рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе разработанной методологии впервые корректно поставлена и решена энергетическим способом задача о предельном состоянии горной породы в виде естественной отдельности, нагруженной распорным статическим средством через одиночный шпур. В результате проведенных исследований получена аналитическая зависимость энергоемкости статического разрушения горных пород, которая включает как объемную удельную энергию потенциальной деформации, так и удельную поверхностную энергию.

Ключевые слова: задача Ляме; разрушение горных пород; шпуровой способ; квазихрупкое разрушение; модель разрушения; трещина; шпуровое давление; предельное разрывающее давление; энергоемкость разрушения.

Введение. Теории прочности и разрушения материалов это фундаментальные научные направления, цели и задачи которых по изучению физико-механического состояния горных пород противоположны. В первом случае на практике работоспособность и устойчивость сплошного твердого тела оценивают через известные феноменологические гипотезы прочности, что дает возможность осуществлять техническую диагностику неразрушения материалов в конструкциях и сооружениях при экстремальных условиях эксплуатации [1]. Во втором случае рассматриваются технико-технологические условия (производительность, энергоемкость) эффективного разрушения материала твердого тела, т. е. его диспергирования [2].

Теории прочности и разрушения материалов твердого тела исследуют его различное состояние: сплошное (С) или разрушенное (Р). При этом переход материала из С-состояния в Р-состояние осуществляется, если характер напряженно деформированного состояния (НДС) достигает некоторого критического значения для данного материала [3]. Если характер НДС не достигает своих предельных значений, например предела прочности на разрыв, то разрушения не произойдет и твердое тело сохраняет целостность. В рамках такого классического подхода не раскрывается механизм процесса разрушения, для квазихрупкого разрушения при статическом нагружении материалов не представляется возможным корректно решать и объяснять многие физические противоречия между существующей теорией и экспериментом.

Концепции квазихрупкого разрушения упруго-хрупких материалов, обладающих и свойством пластичности, когда твердое тело по всему сечению не разрушается мгновенно, присуще промежуточное П-состояние перехода деформируемого материала из С-состояния в Р-состояние. Область деформируемого материала, где возникает П-состояние, получила название области предразрушения [4], в которой материал всегда деформируется за пределом упругости. В связи с этим в этой области наиболее интенсивно совершается локальное упруго-пластическое разрушение, т. е. С→П→Р переход.

Таким образом, корректное решение любой поставленной задачи горного производства в квазихрупкой постановке состоит в том, чтобы построить необходимую расчетную модель согласно С→П→Р переходам и найти ответы на все актуальные вопросы практики, связанные с рационализацией технико-технологических показателей процесса разрушения горных пород.

Цель работы заключается в получении основополагающего решения задачи в квазихрупкой постановке о предельном равновесии полого цилиндра (задача Ляме), моделирующего некоторый объем твердого тела, деформированного равномерно распределенным внутренним давлением распорных средств, что на практике соответствует разрушению куска горной породы с помощью одиночного шура.

Обзор существующих методик. Шпуровой способ добычи и разделки горных пород (природного камня) применялся человечеством с давних времен [5, 6], однако общепринятых и общепризнанных проектно-расчетных методов данного процесса до настоящего времени не существует. Первая попытка создать расчетную схему процесса разрушения горных пород в квазистатической форме по принципу перехода из С-состояния в Р-состояние опубликована в работе [7], в которой также проанализированы существующие на период публикации методы расчета энергосиловых показателей процесса во взаимосвязи с его технологическими показателями. Целесообразно рассмотреть эволюцию этих классических подходов в системе С→П→Р-состояний.

Очевидно, первой аналитической зависимостью, связывающей силовые условия разрыва с физико-механическими показателями породы и технологическими параметрами процесса, является уравнение [8]:

$$\frac{p}{\sigma_p} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{H}{h_{\text{ш}}} (n-1), \quad (1)$$

где p и σ_p – внутреннее давление распорных средств и предел прочности горных пород на разрыв, Па; H и $h_{\text{ш}}$ – высота куска породы и шпура, м; $n = R/r_{\text{ш}}$ – размерный параметр в относительной форме, R – радиус окружности, описывающей поперечный размер куска, м, $r_{\text{ш}}$ – радиус шпура, м.

При заданных значениях σ_p , H и $h_{\text{ш}}$ имеем линейную связь между внутренним давлением p и относительным размером разрываемого куска n .

Зависимость (1) относится к С-состоянию и не имеет практической значимости, так как не отвечает на вопрос о степени диспергирования (т. е. на сколько отдельных частей разрывается исходный кусок), а также не имеет корректного физического обоснования.

Последний недостаток в какой-то мере устраняется в последующих работах, где на основе второй теории прочности с привлечением задачи Ляме была получена следующая технологическая взаимосвязь:

$$\frac{p}{\sigma_p} = \frac{n^2}{2(1+\mu)}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент Пуассона.

Как видим, уравнение (2) относится также к С-состоянию, но имеет степенную зависимость внутреннего давления относительно поперечного размера разрываемого куска горной породы со всеми присущими недостатками в рассмотренном случае.

Бесперспективность классического подхода исследователей к оценке разрушения упруго-хрупких материалов, к которым относятся горные породы, заключается в том, что условия прочности для сплошных тел могут быть использованы в технологических расчетах лишь на первой стадии разрушения, а именно на стадии зарождения микротрещин в куске (образце) породы. Основная идея неклассических подходов современной механики разрушения квазихрупких материалов сводится к положению, согласно которому за процессом зарождения трещин разрыва следует стадия их роста до критических размеров, что и определяет промежуточное П-состояние, связывающее в общей расчетной модели С-состояния с Р-состоянием. Именно через зону предразрушения, т. е. через П-состояние раскрывается сам механизм разрушения.

Корректно решить поставленную задачу в системе С→П→Р-состояний представляется возможным только в рамках *энергетического подхода*. Целесообразно проанализировать результаты энергетической методики расчета технологических параметров, предложенной в работе [9], в которой в соответствии с энергетическим принципом Гриффитса полагается, что в результате образования и роста трещин на стенке шпура вся энергия распорного средства расходуется на образование свободной поверхности разрыва. Из составленного в работе [9] энергетического баланса получено:

$$p = \left[2(n-1) \frac{\gamma E_{\text{НРС}}}{r_{\text{ш}}} \right]^{0.5},$$

где γ – удельная поверхностная энергия разрушения материала породы, Дж/м²; $E_{\text{НРС}}$ – модуль упругости невзрывчатого разрушающего средства (НРС), Па.

При этом в расчетах давление p , при котором возникают и развиваются трещины разрыва, приравнивается пределу прочности на разрыв материала породы $P_{\text{пр}} = \sigma_p$, и таким образом определяется показатель n . Несмотря на энергетическую сущность рассмотренной методики, некорректность ее формулировки проявляется в том, что вся энергия НРС относится к этапу развития трещин, т. е. к Р-состоянию. В этом случае в расчетах игнорируются С-состояние и П-состояние.

Разработка авторской модели квазистатического разрушения. После проведенного краткого обзора существующих методик расчета силовых факторов, необходимых для разрушения отдельных объемов (крупных кусков) горной породы одиночным шпуром, вернемся к работе [7] с целью оценки ее результатов и недостатков. Научной новизной является сформулированное положение: в условиях квазихрупкого разрушения при статическом разрыве объемов горной породы шпуровым способом работа разрывающей силы на перемещениях, обусловленных максимальной деформацией растяжения и деформацией раскрытия трещины нормального разрыва, равна потенциальной энергии вновь образованной поверхности. Вновь образованная поверхность определяется количеством радиальных трещин разрыва, характеризующих степень разделения исходного объема породы на отдельные не связанные между собой части. Количество трещин входит в качестве одного из аргументов в энергетический баланс, на основе которого решается поставленная задача. Поэтому результаты анализируемой работы дополнены исследованиями [10], согласно которым количество трещин определяется по формуле:

$$n_{\text{тр}} = \pi f^2 \frac{(n+1)}{(n-1)}, \quad (3)$$

где f – безразмерная функция, зависящая от физико-механических свойств материала породы.

Величина функции f оценивается на основе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях. Основным итогом исследований является вывод о зависимости количества сквозных трещин от соотношения размеров кольцевой зоны, ограниченной с внешней стороны поперечным размером куска породы, а с внутренней – диаметром шпура. Иными словами количество трещин $n_{\text{тр}}$ зависит от параметра n , функциональный предел которого с его увеличением приводит к единице, и тогда $n_{\text{тр}} = \pi f^2$. Для примера приведем экспериментальные данные [10], полученные на мраморном образце (среднезернистое строение) в виде керна диаметром 40 мм с просверленным по центру отверстием диаметром 8 мм на глубину 60 мм. Разрывающая нагрузка создавалась усилием от НРС, что привело к разделению образца на четыре части. По условиям эксперимента $n = 5$, было получено $f = \sqrt{8/3\pi}$, что определяет $n_{\text{тр}} = \pi f^2 \approx 3$.

Методическую основу расчетной модели квазистатического разрушения упруго-хрупких материалов составляет рассмотрение явления образования и развития трещины, чему способствует полный анализ системы С→П→Р-состояний

при нагружении твердого тела. При этом П-состояние как промежуточное определяет область материала, где деформирование всегда происходит за пределом упругости и поэтому в этой области наиболее интенсивно проявляется и совершается локальное упруго-пластическое разрушения материала. В работе [11] по системе С→П→Р-состояний корректно рассмотрена задача предельного равновесия растягиваемой пластины с внутренней трещиной l_0 (пластина Гриффитса). Детальный анализ П-состояния в данной задаче позволил обосновать энергосиловые показатели и характеристики зоны предразрушения, а именно:

– характерный размер области П-состояний в виде равенства длины внутренней трещины длине зародышевой трещины разрыва $\Delta l_{\text{тр.з}} = l_0$, что позволило замкнуть расчетную модель в виде энергетического баланса процесса разрушения;

– предельную (критическую) нагрузку p_k , Па, по достижении которой наступает локальный разрыв на стенке шпура:

$$p_k = \left[\frac{2}{\pi} \cdot \frac{\gamma E}{r_{\text{ш}}} \right]^{0,5}; \quad (4)$$

– удельную энергию, которую необходимо затратить на образование единицы поверхности разрыва критической величины:

$$\gamma_k = k_k^2 \frac{\sigma_p^2}{2E}; \quad (5)$$

– взаимосвязь энергетических показателей зон γ_k и γ_p развития критических (зародышевых) и сквозных трещин нормального разрыва:

$$\gamma_k / \gamma_p = e_\gamma, \quad (6)$$

где E – модуль упругости материала породы, Па; k_k – текстурно-структурная константа материала породы, $\text{м}^{0,5}$; e_γ – энергетический коэффициент полезного действия (КПД) процесса разрыва материала горной породы:

$$e_\gamma = \frac{2}{(n^2 - 2)}. \quad (7)$$

Энергетический КПД является неотъемлемым условием оценки величины критерия γ_p квазихрупких материалов в различных технологических процессах горного производства. Предельное значение КПД разрыва, равное единице ($e_\gamma = 1$) характерно только для области предразрушения при $n = 2$, т. е. для зоны развития зародышевой трещины до критической величины $\Delta l_{\text{тр.з}} = r_{\text{ш}}$.

Энергетические критерии квазихрупких материалов, полученные в форме (4)–(7), являются основополагающими показателями так называемой *линейной механики хрупкого разрушения горных пород* и вскрывают причину много лет наблюдаемого расхождения теории и практики, когда необратимо затраченная энергия, приходящаяся на единицу площади свободной поверхности, определенная на основе экспериментов, оказывалась в разы, и даже на порядки больше теоретически вычисленных значений, соответствующих идеально хрупкому отрыву. Особенно существенно это отличие проявлялось для материалов, обладающих некоторой степенью пластичности [12]. В связи с отмеченным, исследователи

вводят понятие истинной γ_p и эффективной γ_k удельной поверхностной энергии твердого тела [13].

Такое состояние делало бессмысленным использование теоретической величины поверхностной энергии γ_k в практических расчетах и явилось одной из причин разработки новой концепции квазихрупкого разрушения твердых тел – *деформационного критерия раскрытия берегов трещины*. Деформационный критерий δ_k несложно определялся с помощью измерительной техники (датчиков) для образцов различных размеров и форм (как центральной, так и краевой трещин). В этом направлении прошлого столетия сформировалась научная школа на базе Физико-механического института Академии наук Украинской ССР под руководством академиков АН УССР Г. Н. Савина и В. В. Панасюка [14].

Предложенная в работе [11] методология и входящие в нее энергосиловые критерии (4)–(7) позволяют с учетом результатов исследований [7] составить уравнение энергетического баланса для расчета всех интересующих практику параметров и показателей статического разрушения объемов (крупноблочных кусков) горной породы одиночным шпуром с применением различных распорных средств:

$$\chi \frac{(1+\mu)}{E} (p_p^2 - p_k^2) = \frac{n_{тр} l_{тр}}{\pi r_{ш}^2} \gamma_p, \quad (8)$$

где $\chi = \frac{(3n^2 + 1)}{3(n^2 - 1)}$ – показатель энергонасыщенности потенциальной энергией

упругих деформаций материала; p_p – внутреннее давление, разрывающее кусок породы, Па; $l_{тр} = r_{ш} (n - 1)$ – количество и длина радиальной сквозной трещины, м.

Определение по уравнению (8) разрывающего кусок породы внутреннего давления p_p в зависимости от параметра n возможно если известно количество трещин, возникающих и получивших дальнейшее развитие до предельной длины, когда кусок породы распадается на отдельные части. Результат (3), рассмотренный в обзорной части работы, является первым приближением ответа на поставленный вопрос. Аналитического общепринятого решения данной задачи до сих пор не существует. Расчет построим на основе уравнения (8) по двухступенчатой схеме, когда вначале находим количество зародышевых трещин $n_{тр.з}$, а затем обосновываем количество сквозных трещин $n_{тр.с}$.

Для определения количества зародышевых трещин принимаем условия П-состояния, т. е. состояния предразрушения, которому отвечают следующие параметры:

$$n = 2; \quad e_\gamma = 1; \quad p_p^2 / p_k^2 = 2; \quad \chi = \sqrt{2}; \quad l_{тр.з} = r_{ш}. \quad (9)$$

С учетом (9) энергетический баланс примет следующий вид:

$$\sqrt{2} \frac{(1+\mu)}{E} p_k^2 = n_{тр.з} \frac{\gamma_k}{\pi r_{ш}}.$$

Откуда с учетом (4) и (6) получим:

$$n_{тр.з} = 2\sqrt{2}(1+\mu). \quad (10)$$

Как показывают экспериментальные исследования, число сквозных трещин $n_{тр.с}$ отличается от зародышевых $n_{тр.з}$, их количество зависит от линейных размеров испытуемого образца, а именно от параметра n . Отмеченная особенность подтверждается и аналитическими исследованиями, из которых следует:

$$n_{тр.с} = n_{тр.з} \frac{\chi}{\sqrt{2}} = 2\chi(1 + \mu). \tag{11}$$

Коэффициент Пуассона для горных пород находится в пределах $\mu = 0,05-0,5$ [15, 16], при этом с повышением крепости данный коэффициент понижается. Как следует из зависимости (10), если $\mu > 0,25$, то прогнозируемое количество зародышевых трещин разрыва стремится к $n_{тр.з} \rightarrow 4$, а если $\mu < 0,25$, то количество зародышевых трещин $n_{тр.з} \rightarrow 3$. Количество сквозных трещин, являясь функцией показателя χ , который с увеличением значения n стремится к единице, снижается по сравнению с $n_{тр.з}$ и составляет величину $n_{тр.с} = n_{тр.з} / \sqrt{2} = 2(1 + \mu)$.

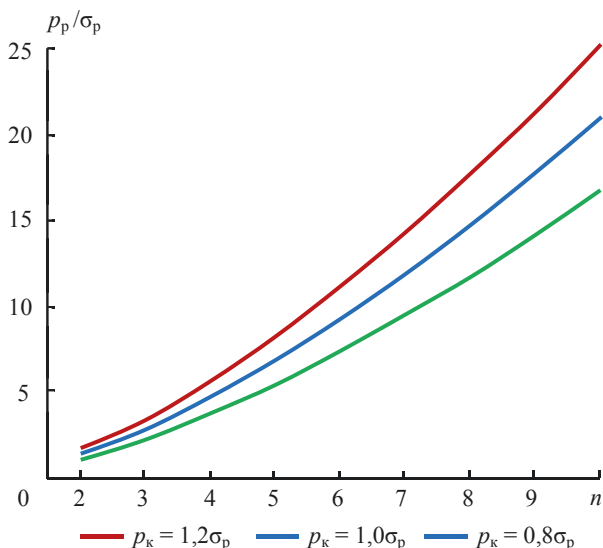


Рисунок 1. График зависимости предельного шпурового давления p_p / σ_p в относительной форме от параметра n для различных значений критической нагрузки p_k

Figure 1. The dependency graph of the limiting blast-hole pressure p_p / σ_p in the relative form on the parameter n for different values of critical load p_k

Таким образом, окончательная расчетная модель Р-состояния задачи Ляме в квазихрупкой постановке (8) будет иметь следующий вид:

$$(p_p^2 - p_k^2) = \frac{(n-1)(n^2-2)}{2\pi} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2,$$

или

$$p_p^2 / p_k^2 = \left[\frac{(n-1)(n^2-2)}{2} \right] + 1, \quad \text{где } p_k^2 = \frac{1}{\pi} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2. \tag{12}$$

Зависимость (12) в графическом виде представлена на рис. 1.

Результаты и обсуждение. Из полученных силовых зависимостей (12) следует, что предельное разрывающее воздействие создается внутренним статическим давлением p_p на стенки шпура, величина которого пропорциональна критическому давлению p_k , вызывающему локальный разрыв внутренней поверхности шпура и появление трех или четырех зародышевых трещин в зависимости от величины коэффициента Пуассона μ материала горной породы. На разрывающее кусок породы давление p_p также влияет параметр n , характеризующий поперечный к оси шпура размер куска по отношению к радиусу шпура $r_{ш}$.

В рамках поставленной цели и решаемых задач целесообразно сравнить величины критических давлений p_k , полученных по С-состоянию в начальных работах и П-состоянию (12). В первом случае давление p_k предложено оценивать по зависимости $p_k^C = (2/\pi)\chi\sigma_p$ для предельных значений показателя $\chi = (\sqrt{2} - 1, 0)$, соответствующего значениям $n = 2$ и $n > 5$, что в итоге определило $p_k^C = (0,44 - 0,64)\sigma_p$, как условие сохранения сплошности внутренней поверхности шпура, на которой возникают напряжения разрыва σ_p . Второй вариант расчета p_k предусматривает локальный разрыв стенки шпура до величины трещины, равной $\Delta l_{тр.з} = r_{ш}$. В этом случае критическое давление $p_k^П$ при заданной величине σ_p будет зависеть от соотношения $k_k / (\pi r_{ш})^{0,5}$, при этом если принять $k_k = 0,2 - 0,3(\sqrt{m})$, а $r_{ш} = 0,2$ м, то получим $p_k^П = (0,8 - 1,2)\sigma_p$, при $k_k = 0,09 - 0,15(\sqrt{m})$ будем иметь $p_k^П = (0,36 - 0,6)\sigma_p$. Приведенный численный пример показывает, что квазистатический подход в нахождении величины $p_k^П$ отражает чувствительность зарождения трещин разрыва от свойств материала горной породы k_k и технологического параметра $r_{ш}$, а не размера n в относительной форме разрушаемого куска породы.

Удельную работу статического разрывающего воздействия на горную породу от одиночного шпура с помощью распорных средств типа НРС определим как сумму работы, затраченной на зарождение трещин на стенке шпура до критической величины; работы, необходимой на развитие сквозных трещин, разделяющих кусок породы на части. В этом случае удельная работа выражает суммарную работу A , отнесенную к объему $V_{ш}$ шпура: $\alpha_{НРС} = A/V_{ш}$. С учетом зависимости (12) критического давления p_k и величины удельной поверхностной энергии γ_p материала породы [8], удельная работа НРС запишется следующим образом:

$$\alpha_{НРС} = \chi \frac{(1 + \mu)}{E} p_k^2 + \frac{n_{тр} l_{тр}}{\pi r_{ш}^2} \gamma_p. \quad (13)$$

Подстановка в (13) значений p_k^2 и γ_p , а также $n_{тр}$ согласно (11) дает:

$$\alpha_{НРС} = \frac{1}{\pi} \chi \frac{(1 + \mu)}{E} \frac{k_k^2}{r_{ш}} \sigma_p^2 \left[1 + \frac{(n - 1)(n^2 - 2)}{2} \right] = \frac{\chi(1 + \mu)}{E} p_p^2. \quad (14)$$

Так как выражение $\alpha_{\sigma} = \left[\frac{\chi(1 + \mu)}{E} \right] \sigma_p^2$ представляет потенциальную энергию деформации чистого сдвига и в работе [7] принято в качестве энергетической характеристики процесса трещинообразования материала породы, то научный и практический интерес представляет отношение суммарной энергии разру-

нения (14) к ее составляющей, определяющей статическую трещиностойкость хрупких тел:

$$\frac{\alpha_{\text{НРС}}}{\alpha_{\sigma}} = \frac{P_p^2}{\sigma_p^2}. \quad (15)$$

Анализируя энергетическую взаимосвязь в (15), отметим, что удельная энергия α_p характеризует предельное С-состояние деформируемого материала горной породы, а $\alpha_{\text{НРС}}$ – удельную работу разрушения ее отдельного объема, т. е. П-состояние с переходом в Р-состояние.

Полученные результаты в виде зависимостей (12) и (14) имеют значимое прикладное применение, так как являются неотъемлемой частью общих аналитических исследований расчета разрыва в квазихрупкой постановке кусков горной породы одиночным шпуром и отделения монолитов от горного массива посредством строчки шпуров.

Выводы. Рассмотрена проблема использования в проектных технико-технологических расчетах известной энергетической константы материала горной породы γ как удельной поверхностной энергии, затраченной на образование единицы новой поверхности разрыва, согласно чему данная удельная энергия определяет только этап зарождения трещин разрыва в квазихрупких материалах, а этап развития сквозных трещин нормального разрыва отдельных объемов горной породы характеризует удельная энергия γ_p , связанная с γ_k энергетическим коэффициентом полезного действия (КПД) процесса разрыва уравнением $\gamma_p = \gamma_k / e_{\gamma}$, при этом величина энергетического КПД изменяется от единицы для этапа предразрушения до значений гораздо меньших единицы согласно обратно пропорциональной зависимости от длины трещины.

В рамках общего подхода линейной теории разрушения квазихрупких материалов на основе сформулированной методологии энергетическим способом впервые корректно поставлена и решена задача о предельном состоянии отдельного объема горной породы, нагруженного распорным средством через одиночный шпур. Особенностью разработанной модели расчета энергосиловых показателей процесса и степени диспергирования куска породы является детальное рассмотрение механизма разрушения через переходное П-состояние (область предразрушения) от сплошности (С-состояние) материала породы к его разделению на отдельные части (Р-состояние). При таком подходе раскрывается сам процесс разрушения с возможностью определения: критической нагрузки, приводящей к локальному разрушению; величин зародышевых трещин и их количества, а также количества сквозных трещин. Замкнутость и самодостаточность (условие автомодельности) расчетной модели обеспечиваются путем последовательного рассмотрения перехода С→П→Р-состояний.

Разработанная методология постановки и решения задачи предельного состояния разрыва квазихрупких материалов в виде модели толстостенного цилиндра (задача Ляме) является универсальной и может служить в качестве базовой для оценки комплекса вопросов, связанных с горным производством [17–23].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карташов Ю. М., Матвеев Б. В., Михеев Г. В., Фадеев А. Б. Прочность и деформируемость горных пород. М.: Недра, 1979. 269 с.
2. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики разрушения горных пород М.: Недра, 1984. 359 с.
3. Латышев О. Г. Разрушение горных пород. М.: Теплотехник, 2007. 660 с.
4. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1991. 410 с.

5. Алимов О. Д., Мамасаидов М. Т. Технические средства отделения блоков камня от массива. Фрунзе: Илим, 1987. 216 с.
6. Карасев Ю. Г. Технология горных работ на карьерах облицовочного камня. М.: Недра, 1995. 198 с.
7. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Основы расчета технологических параметров добычи природного камня с применением НРС // Добыча обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. 2001. Вып. 1. С. 77–94.
8. Карасев Ю. Г., Бакка Н. Т. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня. СПб: Петербургский горный институт, 1997. 428 с.
9. Христолюбов В. Д., Скоробогатова Л. М. Невзрывчатые способы разрушения горных пород. М: МГГУ, 1991. 105 с.
10. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г., Северин Е. В. Обобщение задачи Гриффитса на объемное разрушение упругохрупкого тела // Добыча обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. 2004. Вып. 4. С. 61–70.
11. Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Концепция квазихрупкого разрушения горных пород применительно к процессам их добычи и первичной переработки // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 4. С. 64–75.
12. Каркашадзе Г. Г. Механические разрушение горных пород. М.: МГГУ, 2004. 220 с.
13. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука; 1974. 640 с.
14. Методы и средства оценки трещиностойкости конструкционных материалов / ред. Панасюк В. В. Киев: Наукова думка, 1981. 314 с.
15. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Мельников Н. В. [и др.]. М.: Недра, 1975. 277 с.
16. Гудман Р. Механика скальных пород. М.: Стройиздат, 1987. 232 с.
17. Lin P., Wong Robina H. C., Tang C. A. Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes // International journal of rock mechanics and mining sciences. 2015. Vol. 77. P. 14–28.
18. Healu D., Jones R. R., Holdsworth R. E. New insights into the development of brittle shear fractures from a 3D numerical model of microcrack interaction // Earth and Planetary Science Letters. 2006. Vol. 249. Issue 1-2. P. 14–28.
19. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. No. 163. P. 311–319. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.12.067
20. Jiajun W., Deyong Z., Renqing H. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock // Procedia Engineering. 2014. No. 73. P. 258–263.
21. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe-Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: Scientific conference on «Bien Dong 2000». Nhatrang; 2000.
22. Sharma R. (ed). Deep Sea Mining. Springer; 2017. 535 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
23. Нго Чан Тхиен Кюи, Кириченко Ю. В. Минеральный потенциал подводных месторождений в Южно-Китайском море Вьетнама // Горная промышленность. 2020. № 1. С. 140–143. URL: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>

Поступила в редакцию 9 декабря 2022 года

Сведения об авторах:

Першин Геннадий Дальтонович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и транспортно-технологических комплексов Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: pshenivla@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3163-018X>
Пшеничная Елена Геннадьевна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры механики Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54

Solving the Lamé problem in the quasi-brittle setting to substantiate the solution scheme for rock breaking by the blast-hole method

Gennadii D. Pershin¹, Elena G. Pshenichnaia¹

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Abstract

Introduction. The blast-hole method of mining and preparing rocks for excavation has been used by mankind since ancient times. However, there are no generally accepted and generally recognized design and calculation methods for this process, which was established in the review part of this work.

Research objective is to develop a basic analytical model for hard rock quasi-brittle materials breaking by a blast-hole method using static thrusts.

Methods of research. A detailed analysis of the breaking mechanism through the transition state from the rock material continuity to its separation is the methodological basis of the developed quasi-static model for calculating the energy-power indicators of the process of separating volumes (pieces) of rock into separate parts. It makes it possible to justify and determine: the irreversible energy of rupture through the energy constant rock material in relation to the process energy efficiency, critical load resulting in local breaking, the size and number of the primordial tension cracks, as well as the number of through cracks.

Result. The obtained indicators and parameters formed the body of the energy balance equation of the irreversible energy of rupture of rock pieces. The developed methodology for setting and solving the problem of the limiting state of quasi-brittle materials rupture in the form of a thick-walled cylinder (the Lamé problem) that simulates a certain solid volume deformed by a uniformly distributed blast-hole pressure of thrusts, is universal and can serve as a base for assessing a set of issues related to mining. The resulting interrelation of indicators made it possible to derive an equation for the energy balance of the rock volumes rupture. Due to the solution for this equation, the critical value of the blast-hole pressure that results in local breaking, the size of primordial cracks, and the corresponding limiting burst pressure were obtained for the first time.

Theoretical novelty. Within the framework of the general approach of the quasi-brittle materials breaking linear theory, based on the developed methodology, the problem of the limiting state of the rock in the form of natural joint loaded with a static thrust through a single blast-hole, was correctly stated and solved by the energy method for the first time. As a result of the research, an analytical dependence of the rock static breaking energy intensity was obtained, which includes both the volumetric specific energy of potential deformation and the specific surface energy.

Keywords: Lamé problem; rock breaking; blast-hole method; quasi-brittle breaking; crack model; crack; blast-hole pressure; limiting burst pressure; energy-intensity of breaking.

REFERENCES

1. Kartashov Iu. M., Matveev B. V., Mikheev G. V., Fadeev A. B. *Rock strength and deformability*. Moscow: Nedra Publishing; 1979. (In Russ.)
2. Rzhetskii V. V., Novik G. Ia. *The fundamentals of rock breaking physics*. Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)
3. Latyshev O. G. *Rock breaking*. Moscow: Teplotekhnika Publishing; 2007. (In Russ.)
4. Panasiuk V. V. *The mechanics of quasi-brittle breaking of materials*. Kyiv: Naukova dumka; 1991. (In Russ.)
5. Alimov O. D., Mamasaidov M. T. *Technical means of separating stone blocks from the rock mass*. Frunze: Ilim Publishing; 1987. (In Russ.)
6. Karasev Iu. G. *The technology of mining at facing stone quarries*. Moscow: Nedra Publishing; 1995. (In Russ.)
7. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. The fundamentals of calculating the process flow parameters of natural stone mining with the use of nonexplosive breaking. In: Pershin G. D. (ed.) *Quarrying, dressing, and using the natural stone: proceedings*. 2001; 1: 77–94. (In Russ.)
8. Karasev Iu. G., Bakka N. T. *Natural stone. Block and wall stone quarrying*. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University Publishing; 1997. (In Russ.)
9. Khristoliubov V. D., Skorobogatova L. M. *Nonexplosive rock breaking*. Moscow: MSMU Publishing; 1991. (In Russ.)
10. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G., Severin E. V. The Griffith problem generalization for the volume fracture of the elastobrittle body. In: Pershin G. D. (ed.) *Quarrying, dressing, and using the natural stone: proceedings*. 2001; 4: 61–70. (In Russ.)
11. Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. The concept of quasi-brittle rock fracture as applied to extraction and processing operations. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 4: 64–75. (In Russ.)
12. Karkashadze G. G. *Mechanical breaking of rock*. Moscow: MSMU Publishing; 2004. (In Russ.)
13. Cherepanov G. P. *Mechanics of brittle breaking*. Moscow: Nauka Publishing; 1974. (In Russ.)
14. Panasiuk V. V. (ed.) *Methods and means of assessing crack resistance of construction materials*. Kyiv: Naukova dumka; 1981. (In Russ.)
15. Melnikov N. V. et al. *Guide (cadaster) of rock physical properties*. Moscow: Nedra Publishing; 1975. (In Russ.)
16. Gudman R. *Rock mechanics*. Moscow: Stroiizdat Publishing; 1987. (In Russ.)

17. Lin P., Wong Robina H. C., Tang C. A. Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple holes. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 2015; 77: 14–28.
18. Healu D., Jones R. R., Holdsworth R. E. New insights into the development of brittle shear fractures from a 3D numerical model of microcrack interaction. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006; 249 (1-2): 14–28.
19. Liu W., Zhu X., Jing J. The analysis of ductile-brittle failure mode transition in rock cutting. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018; 163: 311–319. Available from: doi: 10.1016/j.petrol.2017.12.067
20. Jiajun W., Deyong Z., Renqing H. Experimental study on force of PDC cutter breaking rock. *Procedia Engineering*. 2014; 73: 258–263.
21. Do Minh Tiep, Ton Nu My Du. Preliminary study on Fe-Mn nodules in deep sea bottom of South-eastern Vietnam. In: *Scientific conference on "Bien Dong 2000"*. Nhatrang; 2000.
22. Sharma R. (ed). *Deep Sea Mining*. Springer; 2017. Available from: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0>
23. Ngo Chan Thien Quy, Kirichenko Iu. V. Mineral potential of subsea deposits in Vietnamese part of South China sea. *Gornaya promyshlennost = Mining Industry Journal*. 2020; 1: 140–143. (In Russ.) Available from: <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-1-140-143>

Received 9 December 2022

Information about the authors:

Gennadii D. Pershin – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department of Mining Machines and Transport-Technological Complexes, Novosibirsk State Technical University. E-mail: pshenivla@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0003-3163-018X>

Elena G. Pshenichnaia – PhD (Engineering), senior lecturer, Department of Mechanics, Novosibirsk State Technical University. E-mail: pshenichnaya_e@mail.ru

Для цитирования: Першин Г. Д., Пшеничная Е. Г. Решение задачи Ляме в квазихрупкой постановке для обоснования схемы расчета разрушения горных пород шпуровым способом // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 43–54. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54

For citation: Pershin G. D., Pshenichnaia E. G. Solving the Lamé problem in the quasi-brittle setting to substantiate the solution scheme for rock breaking by the blast-hole method. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 43–54 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-43-54

Обоснование оптимального порядка отработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива

Балек А. Е.¹, Харисов Т. Ф.¹, Авдеев А. Н.¹, Харисова О. Д.^{1*}

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: olgazheltysheva@gmail.com

Реферат

Введение. При выборе последовательности отработки рудной залежи главным образом учитывают технологические и организационные факторы. Однако в условиях применения систем с обрушением, когда формируются значительные объемы выработанных пространств, определяющую роль приобретает геомеханический фактор, от которого зависит устойчивость выработок.

Цель работы – выявление зависимости устойчивости подготовительно-нарезных выработок, попадающих в зону влияния выработанного пространства, от последовательности выемки изолированного рудного блока, находящегося в условиях высоких напряжений и низкой прочности рудопородного массива.

Методика проведения исследований. Численное моделирование формирования вторичного напряженно-деформированного состояния окружающего рудопородного массива выполнено методом конечных элементов в программе Rocscience RS3 совместно с оригинальным программным комплексом FEM. Моделирование выполнялось при двух вариантах выемки блока – от центра к флангам и от одного фланга к другому по направлению простирания залежи. Для анализа предложен коэффициент, представляющий произведение протяженности зон концентрации сжимающих напряжений на длительность их существования.

Результаты. На основании анализа распределения участков максимальной концентрации напряжений в приконтурном массиве, а также времени их воздействия обоснована оптимальная последовательность ведения очистных работ по фактору влияния на напряженно-деформированное состояние выработок днища – от фланга к флангу по простиранию залежи.

Выводы. Полученный результат подтверждает модельные представления о механизме перераспределения напряжений массива в процессе выемки линзообразной залежи, предполагающие, что при развитии выработанного пространства по простиранию на его торцах происходит концентрация сжимающих напряжений. Однако интенсивность расширения торцевых участков при варианте от фланга к флангу в два раза выше, чем при варианте от центра к флангу, соответственно и длительность воздействия зон концентрации напряжений на выработку днища оказывается меньше, что отражает предложенный коэффициент.

Ключевые слова: этажное самообрушение; напряженно-деформированное состояние; вторичное поле напряжений; подготовительно-нарезные выработки; устойчивость; отработка рудной залежи.

Введение. При выборе последовательности отработки рудной залежи главным образом учитывают технологические и организационные факторы. Вместе с тем в условиях применения систем с обрушением, когда формируются значительные объемы выработанных пространств, определяющую роль приобретает геомеханический фактор, от которого зависит устойчивость откаточных и подготовительно-нарезных выработок в днищах добычных блоков и панелей [1–8]. В статье представлены результаты исследований по выявлению влияния перераспределения

напряжений в окрестностях выработанных пространств на устойчивость подготовительно-нарезных выработок при разной последовательности ведения очистных работ.

Объект и методы исследований. Исследования проводились на Кемпирсайских хромитовых месторождениях, обрабатываемых шахтой «10-летие независимости Казахстана». Вмещающий массив характеризуется низкими значениями прочности и модуля упругости при сравнительно высоких тектонических напряжениях [9, 10]. Массив практически повсеместно представлен трещиноватыми ультраосновными серпентинизированными породами: дунитами, перидотитами и пироксеновыми дунитами. Несмотря на весьма высокий предел прочности руды и пород в образце, их массив в целом отличает чрезвычайно низкая устойчивость, не превышающая IV–V категорию [6, 11–13]. Основным фактором, снижающим устойчивость массива, является наличие многочисленных хаотично направленных систем трещин и разноориентированных тектонических нарушений, разбивающих его на разномасштабные структурные блоки [14].

Таблица 1. Прочностные и деформационные свойства участков рудопородного массива
Table 1. Strength and strain properties of the ore rock mass sections

Участок	Вмещающий протяженные подготовительные и нарезные выработки			Вмещающий очистные камеры размерами более 30 м и выработанное пространство		
	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности на сжатие, МПа	Предел на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа
Налегающий	3,0	0,3	5	1,0	0,1	4
Рудный	1,0	0,1	4	0,2	0,1	3
Подрудный	4,0	0,4	6	1,0	0,1	4

В ходе исследований определялись закономерности изменений напряженно-деформированного состояния окружающего массива в процессе выемки линзообразной рудной залежи размерами 250 ? 550 м в плане, находящейся вне зоны влияния ранее отработанных рудных тел. Блок обрабатывался системой этажного самообрушения. Днище выработанного пространства располагалось на глубине 900 м в условиях гидростатического первоначального напряженного состояния окружающего массива [15]:

$$\sigma_{\text{верт}} = \sigma_{\text{гор1}} = \sigma_{\text{гор2}} = \gamma H \approx 23 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{\text{верт}}$ – вертикальные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{гор1}}$ – меридиональные горизонтальные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{гор2}}$ – широтные горизонтальные напряжения, МПа; γ – объемный вес налегающего породного массива, Н/м³; H – глубина горных работ, м.

Для построения математической модели и исследований закономерности формирования вторичного напряженно-деформированного состояния массива использовалась программа Rocscience RS3 совместно с оригинальным программным комплексом FEM, разработанным О. В. Зотеевым (сертификат качества России RU АЮ32.ВЮ 00012 № 0111542). Численное моделирование выполнялось методом конечных элементов [16–18].

Параметры прочностных и деформационных свойств основных участков массива, использованные при моделировании в качестве граничных условий, представлены в табл. 1.

Для всех участков массива приняты следующие константы: коэффициент Пуассона – 0,3; угол внутреннего трения – 30 град; сцепление – 2 МПа; характер разрушения любых рудопородных объемов – хрупкий.

Результаты исследований. Промоделированы два варианта последовательности выемки геологического блока: от центра к флангам (Ц–Ф) и от одного фланга к другому по направлению простирания залежи (Ф–Ф). Анализировались изменения первоначального напряженного состояния массива в окрестностях 18 выработок днища, разграничивающих рассматриваемый блок по простиранию залежи (рис. 1–3).

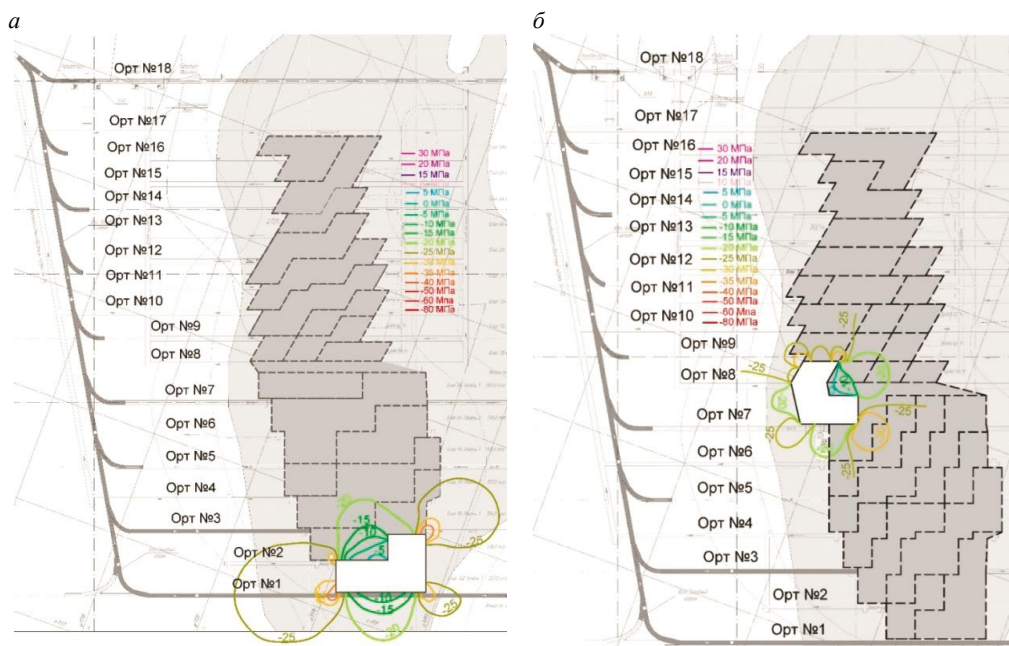


Рисунок 1. План горизонта выпуска с изолиниями максимальных главных нормальных напряжений вмещающего массива, формирующихся на уровне днища после выемки: *а* – 7 % площади геологического блока в условиях отработки от южного фланга к северному; *б* – 4 % площади геологического блока в условиях отработки от центра к флангам

Figure 1. Draw level plan with isolines of maximum principal normal stresses of the enclosing rock mass formed at the bottom level after excavation: *a* – 7% of the geological block area under conditions of mining from the southern flank to the northern flank; *b* – 4% of the geological block area under conditions of mining from the center to the flanks

Моделирование выполняли для условий плоской деформации сплошной упругой изотропной среды и при отсутствии бокового распора от обрушенных пород. В общей сложности промоделирован 21 этап развития вторичного НДС массива, последовательно формирующегося вокруг выработанного пространства по мере выемки геологического блока. Из них 12 этапов – в варианте отработки Ф–Ф, 9 этапов – в варианте Ц–Ф.

Анализировались распределения максимальных напряжений, формирующихся на уровне горизонта выпуска после последовательной выемки следующих частей от общей площади 137 500 м² блока:

– для варианта Ф–Ф: 7 % (рис. 1, а), 16, 27, 38, 51, 66, 73, 79, 86, 89, 95 и 100 % (рис. 2);

– для варианта Ц–Ф: 4 % (рис. 1, б), 12, 22, 35, 49, 63, 77, 88 и 100 % (рис. 2).

По итогам моделирования отстроены распределения тех максимальных напряжений, которые существенно (более чем на 20–25 %) превышали фоновый уровень напряженного состояния окружающего массива, составляющий 23 МПа. При этом показатели для двух откаточных ортов № 1 и № 18 были выделены особо, поскольку эти выработки должны гарантированно сохраняться на весь период отработки блока.

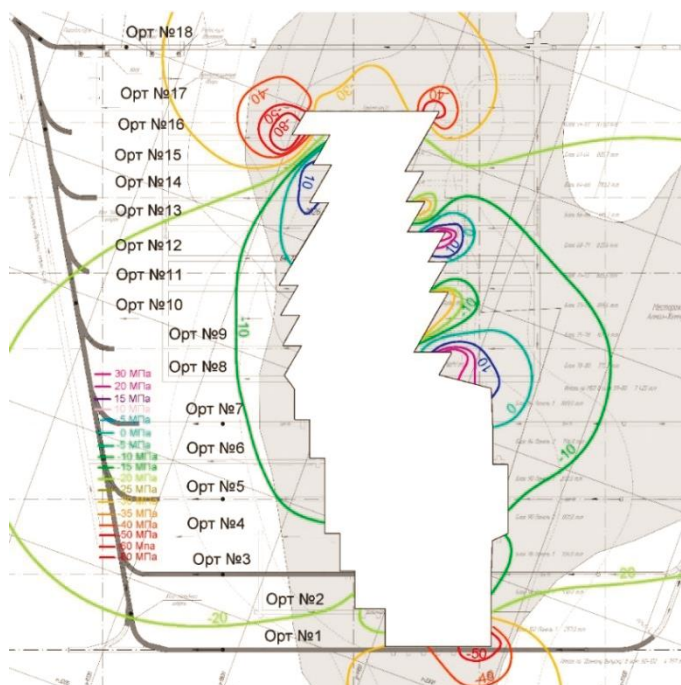


Рисунок 2. План горизонта выпуска с изолиниями максимальных главных нормальных напряжений вмещающего массива, формирующихся на уровне днища после выемки 100 % площади геологического блока

Figure 2. Draw level plan with isolines of maximum principal normal stresses of the enclosing rock mass formed at the bottom level after excavating 100% of the geological block area

На примере откаточного орта № 1 распределения максимальных по модулю главных нормальных напряжений для двух вариантов отработки представлены на рис. 3. Для выявления зависимости напряженного состояния от последовательности выемки залежи использован коэффициент, представляющий произведение протяженности зон концентрации сжимающих напряжений L и длительности t их существования и, соответственно, воздействия на крепь.

Результаты математического моделирования приведены в табл. 2 и 3 для варианта Ф–Ф и для варианта Ц–Ф соответственно. В табл. 4 представлен сопоставительный анализ рассматриваемых последовательностей ведения очистных работ в форме разности суммарных показателей вариантов Ф–Ф и Ц–Ф с оценкой их значимости по критерию χ -квадрат.

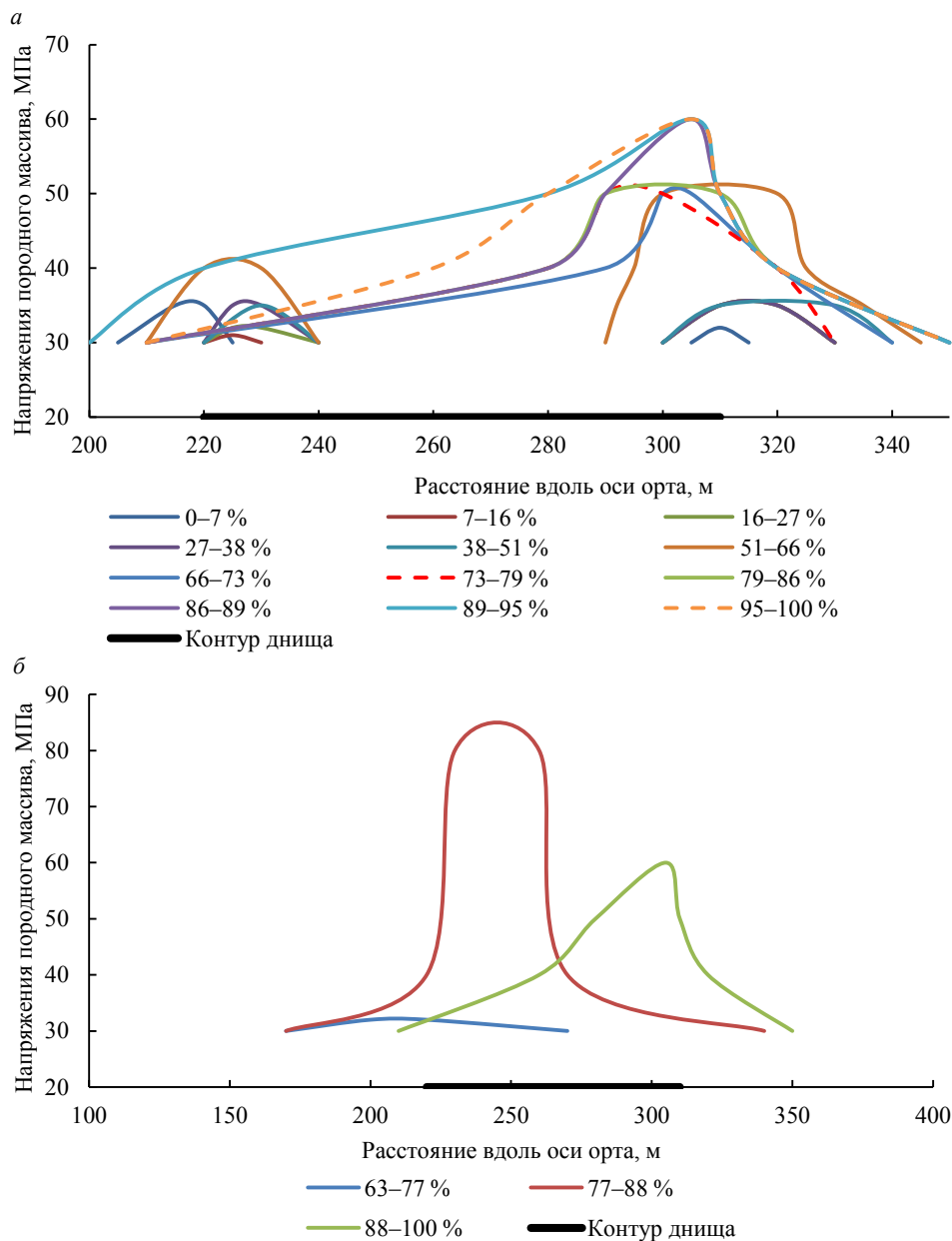


Рисунок 3. Напряженное состояние вмещающего массива по оси расположения орта № 1 на различных этапах отработки (в % от площади блока) для двух вариантов: *а* – вариант Ф–Ф, выемка от южного фланга блока к северному; *б* – вариант Ц–Ф, выемка от центра к флангам

Figure 3. Stress state of the enclosing rock mass along the axis of cross-cut no. 1 at different stages of mining (in % of the block area) for two variant s: *a* – F–F variant, excavation from the southern flank of the block to the northern flank; *b* – variant C–F, excavation from the center to the flanks

Таблица 2. Суммарные пространственно-временные показатели зон концентрации напряжений различной интенсивности, формирующихся во вмещающем массиве днища блока в местах расположения ортов при варианте Ф–Ф

Table 2. Total space-time indicators of stress concentration zones of different intensity, formed in the enclosing rock mass of the block bottom around cross-cuts under the F–F variant

Номер орта	Напряжения > 30 МПа		Напряжения > 50 МПа		Напряжения > 80 МПа	
	$L, \text{ м}$	$L \times t$	$L, \text{ м}$	$L \times t$	$L, \text{ м}$	$L \times t$
№ 1	153	7449	40	925	–	–
№ 2	30	250	–	–	–	–
№ 3	40	320	–	–	–	–
№ 4	10	110	–	–	–	–
№ 5	60	560	–	–	–	–
№ 6	50	550	–	–	–	–
№ 7	90	1130	–	–	–	–
№ 8	70	990	–	–	–	–
№ 9	40	880	–	–	–	–
№ 10	30	210	–	–	–	–
№ 11	100	1510	20	300	–	–
№ 12	110	2020	20	140	–	–
№ 13	110	1530	20	120	–	–
№ 14	170	2640	45	315	30	210
№ 15	190	2260	50	500	30	300
№ 16	260	2940	65	385	20	100
№ 17	280	3490	70	475	10	60
№ 18	310	3740	330	3160	–	–
<i>Суммы:</i>						
все орты № 1–№ 8	2103	32 579	330	3160	90	670
кроме № 1 и № 18	1640	21 390	290	2235	90	670
орты № 1 и № 18	463	11 189	40	925	0	0

Обсуждение результатов. Положительные значения разностей суммарных показателей, представленных в табл. 4, свидетельствуют о благоприятности варианта Ц–Ф, а отрицательные – о благоприятности варианта Ф–Ф. При одной степени свободы для 99 % доверительной вероятности табличное значение коэффициента χ^2 составляет 6,6, а для 70 % – 1,1. Таким образом, суммарные протяженности зон концентрации напряжений свыше 30 МПа в обоих вариантах практически идентичны (разница менее 4–5 %), в том числе и отдельно для откаточных ортов № 1 и № 18. Однако для сумм коэффициентов $L \times t$ получено значимое (свыше 27 %) превышение, указывающее на относительно более благоприятные условия отработки от фланга к флангу по фактору обеспечения устойчивости всех без исключения выработок днища.

Отдельное рассмотрение откаточных ортов № 1 и № 18 дает небольшое (менее 15 %) преимущество для варианта Ц–Ф. Но по фактору протяженности участков концентрации напряжений, превышающих 50–80 МПа, для этих выработок также существенно более благоприятным оказывается вариант Ф–Ф.

Таблица 3. Суммарные пространственно-временные показатели зон концентрации напряжений различной интенсивности, формирующихся во вмещающем массиве днища блока в местах расположения ортов при варианте Ц–Ф

Table 3. Total space-time indicators of stress concentration zones of different intensity, formed in the enclosing rock mass of the block bottom around cross-cuts under the C–F variant

Номер орта	Напряжения > 30 МПа		Напряжения > 50 МПа		Напряжения > 80 МПа	
	<i>L</i> , м	<i>L</i> × <i>t</i>	<i>L</i> , м	<i>L</i> × <i>t</i>	<i>L</i> , м	<i>L</i> × <i>t</i>
№ 1	180	4780	70	760	30	300
№ 2	100	2220	25	700	–	–
№ 3	60	1560	25	325	–	–
№ 4	45	1080	–	–	–	–
№ 5	50	400	30	240	–	–
№ 6	50	400	–	–	–	–
№ 7	50	380	–	–	–	–
№ 8	–	–	–	–	–	–
№ 9	20	80	–	–	–	–
№ 10	40	320	10	80	–	–
№ 11	60	1190	10	110	–	–
№ 12	180	3810	–	–	–	–
№ 13	115	2870	–	–	–	–
№ 14	160	4250	20	280	10	140
№ 15	180	3060	10	100	–	–
№ 16	230	4540	30	300	20	200
№ 17	250	5580	35	420	–	–
№ 18	260	4820	–	–	–	–
<i>Суммы:</i>						
все орты						
№ 1–№ 18	2030	41 340	265	3315	60	640
кроме						
№ 1 и № 18	1590	31 740	195	2555	30	340
орты						
№ 1 и № 18	440	9600	70	760	30	300

Полученный результат подтверждает модельные представления о механизме перераспределения напряжений массива в процессе выемки линзообразной залежи, предполагающие, что при развитии выработанного пространства по простиранию на его торцах происходит концентрация сжимающих напряжений с максимумами на первых выемочных блоках [19]. При последующей отработке торцевых участков и их расширении вкрест простирания залежи концентрация напряжений на торцах снижается. Снижается она и в центральной части выработанного пространства по мере его вытягивания по простиранию. Вследствие этого протяженности зон концентрации напряжений свыше 30 МПа не зависят от порядка отработки, поскольку при обоих вариантах вынимаются одинаковые объемы руды, которые, в конечном итоге, и определяют концентрацию напряжений в окружающем массиве. Однако интенсивность расширения торцевых участков выработанного пространства при варианте Ф–Ф в два раза выше, чем при варианте Ц–Ф. Соответственно и длительность воздействия зон концентрации напряжений

на выработки днища при варианте Ф–Ф оказывается меньше, чем при варианте Ц–Ф, что и отражает коэффициент $L \times t$.

Заключение. По результатам исследований обоснована предпочтительность варианта отработки от фланга к флангу (по простиранию залежи) по фактору влияния очистных работ на напряженно-деформированное состояние выработок

Таблица 4. Разности суммарных показателей вариантов Ф–Ф и Ц–Ф
Table 4. Differences in the total indicators of the F–F and C–F variants

Номер орта	Напряжения > 30 МПа				Напряжения > 50 МПа				Напряжения > 80 МПа			
	L, м	χ^2	$L \times t$	χ^2	L, м	χ^2	$L \times t$	χ^2	L, м	χ^2	$L \times t$	χ^2
Все орты № 1–№ 18	73	1,3	–8761	1038,4	65	7,1	–155	3,7	30	6,0	30	0,7
Кроме № 1 и № 18	50	0,8	–10 350	2016,2	95	18,6	–320	21,4	60	30,0	330	107,8
Орты № 1 и № 18	23	0,6	1589	121,5	–30	8,2	165	16,2	–30	30,0	–300	300,0

днища для условий гидростатического напряженного состояния окружающего породного массива. С целью проверки результатов теоретических исследований на руднике планируется проведение натурных изысканий, которые позволят сделать соответствующие корректировки расчетов и получить окончательный вывод об эффективности предложенной технологической схемы отработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зиновьев В. В., Стародубов А. Н., Николаев П. И., Кузнецов И. С. Применение имитационного моделирования для оценки вариантов отработки выемочного блока короткими забоями // ГИАБ. 2018. № S48. С. 181–193.
2. Щукин С. А., Неверов А. А., Неверов С. А. Отработка подкарьерных запасов подэтажно-камерной технологией с формированием искусственных целиков и породной закладки // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2021. Т. 2. № 4. С. 205–215.
3. Tan B., Ren F., Ning Y., He R., Zhu Q. A new mining scheme for hanging-wall ore-body during the transition from open pit to underground mining: A numerical study // Advances in Civil Engineering. 2018. Art. 1465672.
4. Kubuzov E. A., Nagovitsyn Y. N., Andreev A. A., Rukavishnikov G. D. Assessment of effect of rock mass damage on underground stability of excavations in the Second Southern Lens of Mayak Mine // Gornyi Zhurnal. 2016. Vol. 7. P. 23–28.
5. Зубков А. В., Сентябов С. В. Выбор методов управления горным давлением на Гайском подземном руднике // ГИАБ. 2021. № 5-2. С. 64–79.
6. Avinash P., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines – A modified RMR approach // Current Science. 2018. Vol. 114. No. 10. P. 2167–2174.
7. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. Guidelines on caving mining methods: the underlying concepts. Queensland: The University of Queensland, 2017. 282 p.
8. Авдеев А. Н., Зотеев О. В., Сосновская Е. Л. Прогноз развития геомеханической ситуации при переходе от открытой к подземной технологии выемки крутопадающей залежи системами с обрушением горных пород // ГИАБ. 2021. № 2. С. 6–15.
9. Panzhin A., Panzhina N. Monitoring of the stress-strain state of open pits' adjacent rock mass // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 192. Art. 04017. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204017
10. Панжин А. А., Ручкин В. И. Диагностика современной геодинамической активности массива на шахтах Донского ГОКа // Маркшейдерия и недропользование. 2013. № 6(68). С. 32–35.
11. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses / Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullock) // Society of Mining Metallurgy and Exploration. 2001. P. 475–481.
12. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No. 6. P. 332–339.

13. Шуплецов Ю. П. Прочность и деформируемость скальных массивов. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 195 с.
14. Сашурин А. Д. Формирование напряженно-деформированного состояния иерархически блочного массива горных пород // Проблемы недропользования. 2015. № 1(4). С. 38–44.
15. Балеk А. Е., Озорнин И. Л., Каюмова А. Н. Совместные замеры напряженного состояния и модуля упругости породного массива при проходке шахтных стволов // ГИАБ. 2020. № 3-1. С. 21–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-21-36
16. Wilhelm Rust. Non-linear finite element analysis in structural mechanics. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 363 p.
17. Moatamedi M., Khawaja H. Finite element analysis. Boca Raton: CRC Press, 2018. 154 p.
18. Сентябов С. В. Управление горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 2. С. 62–73. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73
19. Балеk А. Е. Явление самоорганизации деформационных полей массивов горных пород и его использование при решении задач геомеханики // Проблемы недропользования. 2016. № 4(11). С. 90–96.

Поступила в редакцию 20 марта 2023 года

Сведения об авторах:

Балеk Александр Евгеньевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН. E-mail: balek@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0407-2450>

Харисов Тимур Фаритович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геомеханики подземных сооружений Института горного дела УрО РАН. E-mail: timur-ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

Авдеев Аркадий Николаевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геодинамики и горного давления Института горного дела УрО РАН. E-mail: avdeev0706@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

Харисова Ольга Дмитриевна – научный сотрудник лаборатории сдвижения горных пород Института горного дела УрО РАН. E-mail: olgazeltyshyeva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5664-1662>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-55-65

Substantiation of the optimal mining sequence of an ore deposit under conditions of high stress and low rock mass strength

Aleksandr E. Balek¹, Timur F. Kharisov¹, Arkadii N. Avdeev¹, Olga D. Kharisova¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. When choosing the mining sequences of an ore deposit, technological and organizational factors are mostly taken into account. However, when using systems with caving which involve considerable mined-out spaces, the geomechanical factor, which determines stability of mine workings, plays a determining role.

The research objective is to reveal the dependence between the stability of the development and face-entry headings within the mined-out space influence zone and the excavation sequence of the isolated ore block under conditions of high stress and low ore and rock mass strength.

Methods of research. Numerical modeling of the enclosing ore and rock mass secondary stress-strain state formation was carried out by the finite element method in the Rocscience RS3 program together with the original FEM software package. Modeling was performed for two variants of block excavation – from the center to the flanks and from one flank to the other along the strike. For the analysis, we proposed a coefficient representing the product of compressive stress concentration zones length by their existence duration.

Results. Based on the analysis of the maximum stress concentration areas distribution in the marginal rock mass, as well as the time of their influence, the optimal sequence of actual mining was substantiated according to the factor of influence on bottom workings stress-strain state – from flank to flank along the strike.

Conclusions. The obtained result confirms the model representations about the mechanism of rock mass stressed redistribution in the process of lens-shaped deposit excavation. The representations

suggest that during mined-out space development along the strike, compressive stresses concentrate at its ends. However, the intensity of end sections expansion in the flank to flank variant is two times as high as in the center to flank variant. The duration of the stress concentration zones impact on the bottom workings is therefore less, which is indicated by the proposed coefficient.

Keywords: sublevel undercut caving; stress-strain state; secondary stress field; face-entry headings; stability; ore deposit mining.

REFERENCES

1. Zinoviev V. V., Starodubov A. N., Nikolaev P. I., Kuznetsov I. S. Simulation use for evaluation of working block mining variants in pillar mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2018; S48: 181–193. (In Russ.)
2. Shchukin S. A., Neverov A. A., Neverov S. A. Extraction of open pit bottom reserves by room-and-pillar method using hybrid backfill. *Interekspo Geo-Sibir = Interexpo GEO-Siberia*. 2021; 2(4): 205–215. (In Russ.)
3. Tan B., Ren F., Ning Y., He R., Zhu Q. A new mining scheme for hanging-wall ore-body during the transition from open pit to underground mining: A numerical study. *Advances in Civil Engineering*. 2018. Art. 1465672.
4. Kubuzov E. A., Nagovitsyn Y. N., Andreev A. A., Rukavishnikov G. D. Assessment of effect of rock mass damage on underground stability of excavations in the Second Southern Lens of Mayak Mine. *Gornyi Zhurnal*. 2016; 7: 23–28.
5. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Selecting ground control methods in Gai mine. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 5-2: 64–79. (In Russ.)
6. Avinash P., Murthy V. M. S. R., Prakash A., Singh A. K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines – A modified RMR approach. *Current Science*. 2018; 114(10): 2167–2174.
7. Laubscher D., Guest A., Jakubec J. *Guidelines on caving mining methods: the underlying concepts*. Queensland: The University of Queensland, 2017.
8. Avdeev A. N., Zoteev O. V., Sosnovskaia E. L. Geomechanical situation prediction in transition from open to underground mining of steeply dipping ore body by systems with caving. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 2: 6–15.
9. Panzhin A., Panzhina N. Monitoring of the stress-strain state of open pits' adjacent rock mass. *E3S Web of Conferences*. 2020; 192: Art. 04017. Available from: doi: 10.1051/e3sconf/202019204017
10. Panzhin A. A., Ruchkin V. I. Diagnostics of the recent geodynamical activity of solid mass at the mines of Don mining and processing complex. *Marksheideriia i nedropolzovanie = Mine Surveying and Subsurface Use*. 2013; 6(68): 32–35. (In Russ.)
11. Laubscher D. H., Jakubec J. The MRMR rock mass classification for jointed rock masses / Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies (eds. W. A. Hustrulid and R. L. Bullok). *Society of Mining Metallurgy and Exploration*. 2001: 475–481.
12. Meshram V. M., Dahale P. P., Tiwari M. S., Ramteke S. B. Advancement of support system for underground drift excavation – a review. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018; 9(6): 332–339.
13. Shupletsov Iu. P. *Strength and deformability of solid rock*. Ekaterinburg: UB RAS Publishing; 2003. (In Russ.)
14. Sashurin A. D. Forming stressed-deformed state of hierarchically unitized rock mass. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2015; 1(4): 38–44. (In Russ.)
15. Balek A. E., Ozornin I. L., Kaiumova A. N. Joint analysis of rock mass stress state and elasticity modulus during shaft sinking. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 3-1: 21–36. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-21-36
16. Wilhelm Rust. *Non-linear finite element analysis in structural mechanics*. Switzerland: Springer International Publishing; 2015.
17. Moatamedi M., Khawaja H. *Finite element analysis*. Boca Raton: CRC Press; 2018.
18. Sentiabov S. V. Rock pressure management during deep deposit development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 2: 62–73. Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2023-2-62-73 (In Russ.)
19. Balek A. E. The phenomenon of self-organizing deformation fields of rock masses and its application when solving geomechanical problems. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2016; 4(11): 90–96. (In Russ.)

Information about the authors:

Aleksandr E. Balek – DSc (Engineering), leading researcher, Laboratory of Underground Structures Geomechanics, Institute of Mining UB RAS. E-mail: balek@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0407-2450>

Timur F. Kharisov – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Underground Structures Geomechanics, Institute of Mining UB RAS. E-mail: timur-ne@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4668-081X>

Arkadii N. Avdeev – PhD (Engineering), senior researcher, Laboratory of Geodynamics and Rock Pressure, Institute of Mining UB RAS. E-mail: avdeev0706@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1023-7645>

Olga D. Kharisova – researcher, Laboratory of Rock Displacement, Institute of Mining UB RAS. E-mail: olgazeltysheva@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-5664-1662>

Для цитирования: Балек А. Е., Харисов Т. Ф., Авдеев А. Н., Харисова О. Д. Обоснование оптимального порядка обработки рудной залежи в условиях высоких напряжений и низкой прочности массива // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 55–65. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-55-65

For citation: Balek A. E., Kharisov T. F., Avdeev A. N., Kharisova O. D. Substantiation of the optimal mining sequence of an ore deposit under conditions of high stress and low rock mass strength. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 55–65 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-55-65

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 519.688 + 535.64 + 622.807.2

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

Поиск взаимосвязи температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветowych моделей

Амосов П. В.^{1*}, Горячев А. А.¹, Малодушев К. А.²,
Макаров Д. В.¹, Маслобоев В. А.¹

¹ Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия

² Мурманский Арктический государственный университет (филиал), г. Апатиты, Россия

*e-mail: p.amosov@ksc.ru

Реферат

Актуальность. Высыхание поверхности пляжа хвостохранилищ приводит к ее ветровой эрозии. В результате усиливается процесс пыления, что приводит к нарушению функционирования экосистем прилегающих территорий и оказывает негативное влияние на здоровье населения. Для упрощения технологии нанесения реагентов и минимизации процессов пыления представляется перспективным использование цифровых фотоснимков, получаемых в том числе с помощью беспилотных летательных аппаратов.

Цель исследования. Определение количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов отходов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab.

Методология исследования. На стандартном оборудовании выполнен лабораторный эксперимент по определению температуры и влажности проб поверхностного слоя хвостохранилища. При естественном освещении и ультрафиолетовом свете сделаны цифровые снимки проб. На первом этапе изображения подвергли компьютерной обработке для получения значений компонент двухцветowych моделей – RGB (рассчитаны индексы покраснения и насыщения) и Lab (рассчитан показатель разницы цвета, использованы два эталона – черный и белый). На втором этапе в качестве «нулевого» приближения исследована простейшая (линейная) аналитическая зависимость температуры от влажности и наоборот.

Результаты и их анализ. Выполнено сравнение коэффициентов расчетных линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами прямой обработки данных эксперимента. Показано, что при естественном освещении минимальные отклонения для зависимости температуры от влажности соответствуют индексу покраснения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике; минимальные отклонения для зависимости влажности от температуры соответствуют индексу насыщения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике. Продемонстрировано, что при УФ-свете минимальные отклонения для зависимости температуры от влажности соответствуют индексу насыщения в RGB-методике и черному эталону в Lab-методике; минимальные отклонения зависимости влажности от температуры соответствуют индексу покраснения в RGB-методике и белому эталону в Lab-методике.

Выводы и область применения. Указанные индексы и цвета эталонов могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных экспериментов и натуральных исследований непосредственно на объекте пыления.

Ключевые слова: отходы обогащения; хвостохранилище; температура; влажность; нарушение экосистемы; цифровой фотоснимок; цветовая модель RGB; модель Lab; пыление; поверхность пляжа; БПЛА.

Работа выполнена в рамках темы НИР № гос. рег. 1021051803680-5 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)» и поддержана грантом РФФИ 19-05-50065 Микромир «Комплексная оценка воздействия микрочастиц в выбросах горных и металлургических предприятий Мурманской области на экосистемы и состояние здоровья населения Арктики».

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) имеют широкий спектр применения в приложении к задачам горной промышленности [1–13]:

- планирование и отчетность горных работ;
- идентификация нарушений растительного покрова, в том числе связанных с геологическими аномалиями;
- оценка воздействия на окружающую среду горных работ, мониторинг процесса рекультивации;
- оценка устойчивости уклонов, детального и точного картографирования бортов карьеров, разведка отвалов;
- оценка геометрических параметров карьеров, хвостохранилищ, обследование подземных выработок и др.

Применительно к таким техногенным горнотехническим объектам как хвостохранилища использование БПЛА ограничено в основном либо осмотром, либо оценкой геометрических параметров. Вместе с тем, по мнению сотрудников Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра (ИППЭС КНЦ) РАН, просматривается ряд направлений, по которым область применения БПЛА к техногенным объектам пыления может быть существенно расширена. Примерами таких научно-практических задач являются:

- мониторинг температуры и влажности атмосферы, температуры поверхности хвостохранилища с последующим выходом (через обработку и анализ результатов измерений) на влагонасыщенность поверхностного слоя материала;
- уточнение экспериментальных параметров гидрофизических зависимостей в известных подходах Brooks and Corey и van Genuchten;
- исследование профилей температуры и скорости ветра, влажности поверхностного слоя, концентрации пылевого загрязнения в слое атмосферы до 30–50 м с последующим выходом на формализованное описание горизонтального или вертикального потока массы пыли;
- фиксация динамики площади пыления с поверхности хвостохранилища в период пыльных бурь для валидации моделей процессов пыления, с использованием онлайн интегрированной системы моделирования Enviro-Hirnam, и последующим применением системы моделирования в прогнозных оценках загрязнения окружающей среды в эпизодических явлениях пыления на хвостохранилищах.

Весьма актуальной и интересной представляется задача по применению БПЛА для мониторинга температуры поверхности пылящих хвостов с привязкой к влажности материала, что позволит выполнять прогноз «готовности» конкретной площади хвостохранилища к началу процесса пыления. Именно в приложении к указанной задаче в лабораторном масштабе (пока не натурном эксперименте) выполнены исследования, результаты которых описаны в статье.

Известен ряд публикаций, в которых почвоведы для диагностики почв и описания почвенных профилей как важное физическое свойство используют цвет [14–18]. При этом его количественную оценку получают с помощью спектрофотометров и фотоколориметров. Однако они довольно дороги и неудобны

для эксплуатации в полевых условиях и, следовательно, недоступны для многих людей в целом и для измерения цвета в частности [16]. Напомним, что система Манселла [17, 18] по-прежнему остается основной при описании цвета.

Недорогой альтернативой спектрофотометрам и фотоколориметрам является использование цифровых камер для получения изображений и определения цветов. Цифровые камеры имеют ряд преимуществ перед 35-миллиметровой фото-пленкой, поскольку они позволяют избежать несоответствий при ее проявке и ошибок, возникающих при сканировании [19], а также обеспечивают большую чувствительность, чем стандартная пленка [20]. Недорогие цифровые камеры могут иметь преимущества перед узкополосными изображениями для большинства приложений дистанционного зондирования, так как они уменьшают потребность в точных калибровке и моделировании физических характеристик окружения (атмосфера, функция распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance Distribution Function) и т. д. [20]).

Таблица 1. Экспериментальные значения температуры и расчетные значения влажности образцов

Table 1. Experimental temperature values and calculated humidity values of samples

№ образца	Влажность, усл. ед.	Температура, °С
1	0,3243	17,5
2	0,2958	17,3
3	0,2647	17,2
4	0,2308	17,5
5	0,1936	17,5
6	0,1525	19,7
7	0,1071	19,8
8	0,0826	19,7
9	0,0566	19,7
10	0	19,8

Цифровые камеры на сегодняшний день широко используются не только на бытовом уровне, но и во многих инженерных приложениях. Например, в работе [16] авторы упоминают приложения для измерения цвета поверхностей пищевых продуктов [21], для выявления повреждений растений кукурузы [22], определения местоположения персонажей на изображениях сцен [23], автоматического мониторинга снежного покрова в Антарктиде [24], оценки гумусированности почв на основе обработки их цифровых фотоизображений [25, 26], простого анализа поровой структуры почв [27] и ряд других [28–32]. Отдельно отметим исследования сотрудников Института химии и технологии редких элементов и минерального сырья (ИХТРЭМС) КНЦ РАН, в которых с применением цифровых изображений изучена способность модифицированного титаносиликатной добавкой цементного камня к самоочищению под воздействием видимого и ультрафиолетового (УФ) света [33–35].

Таким образом, цифровые камеры предоставляют новую и простую возможность охарактеризовать образцы почвы. Как и в случае стандартных приложений дистанционного зондирования, следует проявлять осторожность при анализе снятых цифровыми камерами изображений, чтобы избежать несоответствий из-за источника света. Обычно используется настраиваемый источник искусственного

освещения [21, 22]. Для точной калибровки также должны быть известны кривые квантовой эффективности матрицы и спектры пропускания объектива [19]. Однако производители цифровых камер часто не предоставляют их, поскольку они считаются промышленной тайной.

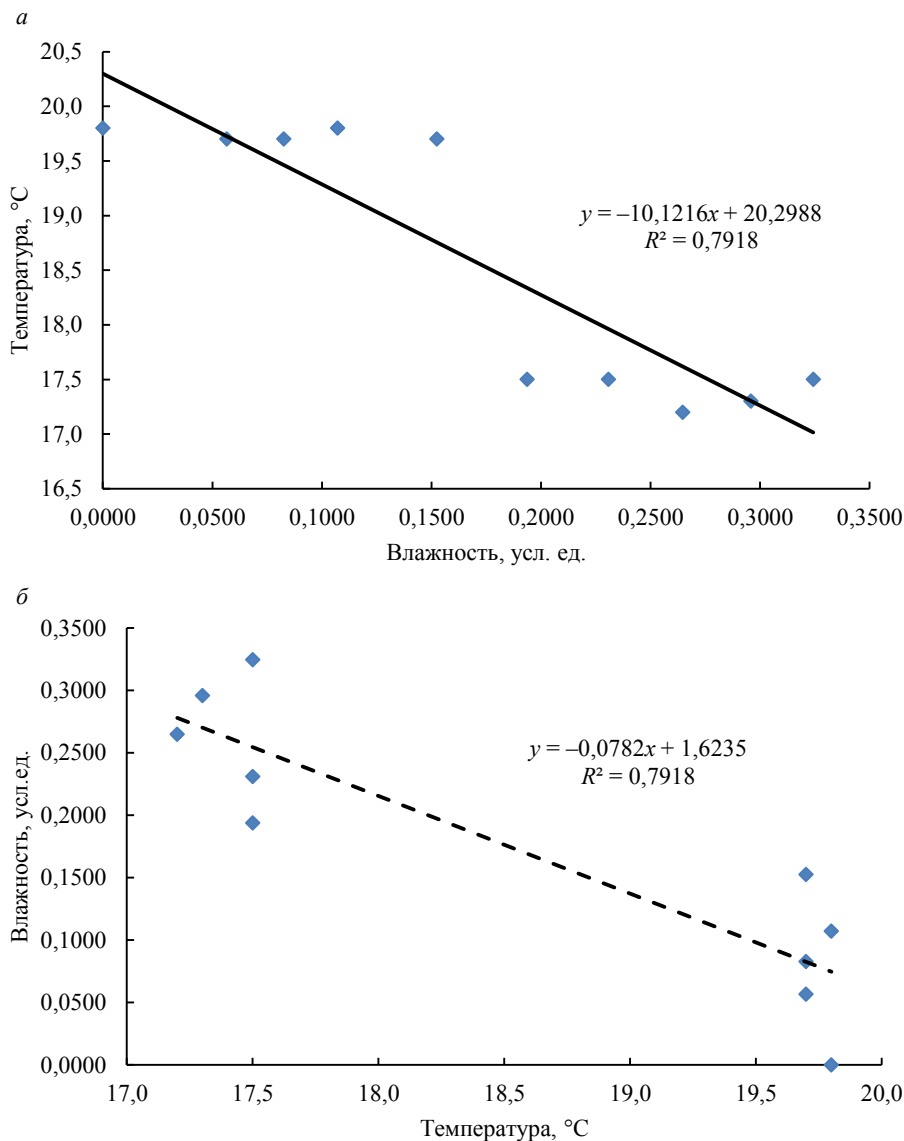


Рисунок 1. Графики (и тренды) экспериментальных зависимостей: *a* – температуры от влажности; *б* – влажности от температуры
Figure 1. Graphs (and trends) of experimental dependencies between: *a* – temperature and humidity; *б* – humidity and temperature

Во многих исследованиях стандартные цветные чипы [21], окрашенные деревянные панели [19, 20] или просто стандартный эталонный белый [36] отображались внутри сцены («калибровка в полете»), чтобы обеспечить калибровку значений RGB.

Используя цифровую камеру в лаборатории и при идеальных условиях освещения, авторы работ [37, 38] смогли предсказать содержание органического углерода в почве (SOC – soil organic carbon) для образцов, собранных в Бретани (Франция). Было отмечено, что лучшие корреляции наблюдались для увлажненных образцов. Кроме того, обнаружено, что измерения цвета с использованием значений интенсивности изображения RGB или цветовых координат Международной комиссии по освещению (CIE – commission international de l'éclairage) Lab показывают хорошую реакцию на SOC (при более высоком содержании SOC, затемняющего почву). Дополнительно авторы обнаружили, что предсказания содержания SOC с использованием простых цветовых моделей с цифровой камеры сопоставимы с полученными с помощью данных спектрального отражения или даже лучше них.



Рисунок 2. Результаты фотосъемки при естественном свете и комнатной температуре
Figure 2. The results of photo survey in natural light and at room temperature

Российские почвоведы [17] отмечают, что цвет почвы является главным морфологическим и диагностическим признаком, который определяется ее химико-минералогическим составом и дает представление о составе почвы и ее физико-химических свойствах. Окраска почвы в видимом диапазоне (400–700 нм) связана с присутствием компонентов, способных поглощать или рассеивать излучение различной длины волны и интенсивности. Органическое вещество, оксиды железа, карбонаты, вода и химический состав глинистых минералов являются основными компонентами, влияющими на цвет почвы [16].

В лабораторных экспериментах при прочих равных условиях (содержание органического вещества, оксидов железа, карбонатов и химический состав глинистых минералов) именно наличие разного количества влаги в образцах будет оказывать влияние на цвет поверхности материала хвостохранилища.

Цель исследования заключается в определении количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab.

Описание методики лабораторного эксперимента. В лабораторном масштабе проведена серия опытов, направленная на определение цветовых различий

материала хвостов обогащения хвостохранилища АНОФ-2 АО «Апатит» (г. Апатиты, Мурманская область) в зависимости от содержания в нем влаги. Для этого были отобраны пробы поверхностного слоя хвостохранилища с применением режущего кольца объемом 815,1 см³ на глубину 25 см от поверхности.

Для проведения лабораторных испытаний взяты 10 образцов массой 50 г. Хвосты высушивали в течение двух суток до воздушно-сухого состояния. Каждый образец орошали дистиллированной водой в следующем количестве: № 1 – 24 мл; № 2 – 21 мл; № 3 – 18 мл; № 4 – 15 мл; № 5 – 12 мл; № 6 – 9 мл; № 7 – 6 мл; № 8 – 4,5 мл; № 9 – 3 мл; № 10 – без орошения. После орошения образцы выдерживали в течение 12 ч. Затем измеряли температуру каждого образца и выполняли фотосъемку при естественном освещении и УФ-свете [33–35]. Понятно, что использование УФ-света возможно только в лабораторных экспериментах.

Таблица 2. Результаты эксперимента и обработки цифровых снимков по методике RGB
Table 2. The results of the experiment and digital images processing using the RGB technique

№ образца	Естественный свет				УФ-свет			
	Пиксели	R	G	B	Пиксели	R	G	B
1	17690	67,4	53,2	36,7	17673	12,5	50,1	41,1
2	18216	64,1	52,1	38,0	17316	12,8	50,4	43,0
3	19440	66,6	53,7	37,6	18432	13,0	54,5	43,2
4	18078	61,6	49,3	33,8	17810	12,9	52,8	40,5
5	18688	68,9	55,5	39,5	17835	18,7	70,7	55,4
6	16728	89,2	71,8	49,7	18034	23,8	87,5	66,8
7	17667	110,2	90,7	65,2	17388	34,5	118,2	97,3
8	18029	114,7	98,1	73,5	18354	30,3	105,5	89,3
9	17112	113,7	97,0	72,2	17955	25,7	91,0	79,9
10	18522	115,2	96,8	71,4	18090	31,4	106,8	96,9
Белый	20083	244,3	220,7	182,6	20066	81,7	246,8	216,9
Черный	19840	27,6	24,6	18,8	18696	14,5	55,2	58,9

Измерение температуры производили с применением универсального цифрового термометра TP-101 (ООО «Теплоприбор», г. Москва, Россия). Точность измерения составляет 0,1 °С. В табл. 1 представлены экспериментальные значения температуры и расчетные значения влажности образцов. Влажность хвостов обогащения определяли в соответствии с ГОСТ 5180-84 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик» (ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М., Изд-во стандартов, 2016. 23 с.).

Построение в «нулевом» приближении графиков (и трендов) данных физического эксперимента дает следующие зависимости температуры от влажности (рис. 1, а) и наоборот (рис. 1, б):

$$T = -10,122w + 20,299; \quad w = -0,078T + 1,624,$$

где T – температура, °С; w – влажность, усл. ед.

Фотографические изображения получены с помощью камеры беспилотного летательного аппарата DJI Mavic 2 Enterprise Dual (SZ DJI Technology Co., Ltd, Китай). Аппарат оснащен оптической и термальной камерами M2ED (FLIR Systems

Inc., США). Одновременно с фотосъемкой образцов фотографировались два эталона – черный и белый (рис. 2).

Весьма любопытно, какие аналогичные зависимости получатся по результатам обработки фотоснимков на базе методик RGB и Lab, принимая экспериментальные зависимости в качестве эталонных.

Описание методик обработки фотоснимков.

Методика RGB. В большом количестве интернет-ссылок и печатных изданий имеется описание цветовой модели RGB и Lab [39–43].

Таблица 3. Расчетные индексы
Table 3. Calculated indices

№ образца	BI	SI	HI	CI	RI
<i>Естественный свет</i>					
1	53,913	0,295	2,721	0,118	8,22E-04
2	52,495	0,256	2,702	0,103	7,65E-04
3	53,954	0,278	2,602	0,107	7,62E-04
4	49,556	0,291	2,587	0,111	9,37E-04
5	55,940	0,271	2,675	0,108	7,03E-04
6	72,069	0,284	2,575	0,108	4,33E-04
7	90,594	0,257	2,529	0,097	2,50E-04
8	96,923	0,219	2,350	0,078	1,90E-04
9	95,829	0,223	2,347	0,079	1,96E-04
10	96,158	0,235	2,449	0,087	2,05E-04
<i>УФ-свет</i>					
1	38,103	–0,534	–7,356	–0,601	3,02E-05
2	38,957	–0,541	–9,162	–0,595	2,98E-05
3	40,847	–0,537	–6,345	–0,615	2,42E-05
4	39,134	–0,517	–5,488	–0,607	2,79E-05
5	52,970	–0,495	–5,797	–0,582	1,79E-05
6	65,025	–0,475	–5,155	–0,572	1,27E-05
7	90,607	–0,476	–7,010	–0,548	7,41E-06
8	81,696	–0,493	–8,284	–0,554	8,76E-06
9	71,474	–0,513	–10,766	–0,56	1,10E-05
10	85,209	–0,511	–14,232	–0,546	8,35E-06

Отмечается, что система RGB (по первым буквам английских названий цветов: Red – красный, Green – зеленый, Blue – синий) является аддитивной цветовой системой. При восприятии цвета человеком именно они непосредственно воспринимаются глазом. Остальные цвета представляют собой смешение трех базовых цветов в разных соотношениях. Максимальные значения всех трех базовых составляющих соответствует белому цвету (255, 255, 255), минимальные – черному цвету (0, 0, 0). В обработке информации иногда используют нормировку цветовых компонент по следующим соотношениям:

– интенсивность $I = (R + G + B)/3$;

– цветовые компоненты $r = R/(R + G + B)$; $g = G/(R + G + B)$; $b = B/(R + G + B)$.

При этом для всех цветов сумма $r + g + b = 1$.

Для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. Приложение) получены осредненные по поверхности образцов значения

цветовых компонент модели RGB. Количество пикселей, принятых в обработку, составляло не менее 16 тыс.

Результаты физического эксперимента и компьютерной обработки снимков под методику RGB приведены в табл. 2.

Таблица 4. Расчетные значения ΔE_{abi}
Table 4. Calculated values of ΔE_{abi}

№ образца	Естественный свет		УФ-свет	
	ΔE_{abWh_1}	ΔE_{abBl_1}	ΔE_{abWh_2}	ΔE_{abBl_2}
1	66,212	17,269	77,879	9,287
2	67,275	15,598	77,923	8,161
3	66,274	16,938	75,624	10,693
4	68,294	15,045	76,316	11,427
5	65,399	17,697	68,077	15,099
6	57,593	26,069	60,554	22,008
7	49,388	34,037	47,982	31,587
8	46,703	36,048	53,433	25,710
9	47,178	35,653	59,819	18,964
10	47,026	36,005	53,621	24,300

В ряде прикладных исследований рекомендуют рассчитывать и анализировать не сами значения RGB или интенсивности, а 5 индексов цвета материала [14–16]: индекс яркости BI; индекс насыщенности SI; индекс оттенка HI; индекс окраски CI; индекс покраснения RI:

$$BI = \sqrt{\{(R^2 + G^2 + B^2) / 3\}};$$

$$SI = (R - B) / (R + B);$$

$$HI = (2R - G - B) / (G - B);$$

$$CI = (R - G) / (R + G);$$

$$RI = R^2 / (BG^3).$$

Расчетные значения индексов исследуемых образцов представлены в табл. 3.

Методика Lab. Успешной попыткой создания аппаратно-независимой модели цвета, основанной на человеческом восприятии цвета, является модель Lab [43]. Любой цвет в Lab определяется яркостью (Lightness) и двумя хроматическими компонентами: параметром a, который изменяется в диапазоне от зеленого до красного через серый, и параметром b, изменяющимся в диапазоне от синего до желтого через серый. Яркость в модели Lab полностью отделена от цвета. Это делает модель удобной для регулирования контраста, резкости и других тоновых характеристик изображения. Модель Lab является трехканальной. Ее цветовой охват включает охваты всех других цветовых моделей и соответствует видимому цветовому охвату стандартного наблюдателя.

Как и для модели RGB, для каждого образца на базе разработанной К. А. Малодушевым программы (см. Приложение) получены осредненные по поверхности образцов значения цветовых компонент модели Lab.

Следуя работам [17, 18], в цветовой модели Lab разница цвета вычисляется как показатель ΔE_{abi} по формуле, которая рекомендована Международной комиссией по освещению [44]:

$$\Delta E_{abi} = \sqrt{(L_i - L_r)^2 + (a_i - a_r)^2 + (b_i - b_r)^2},$$

где L_r, a_r, b_r – референтные значения, полученные с помощью спектрофотометра для стандартного источника освещения; L_i, a_i, b_i – значения, полученные с помощью цифрового устройства для i -го образца.

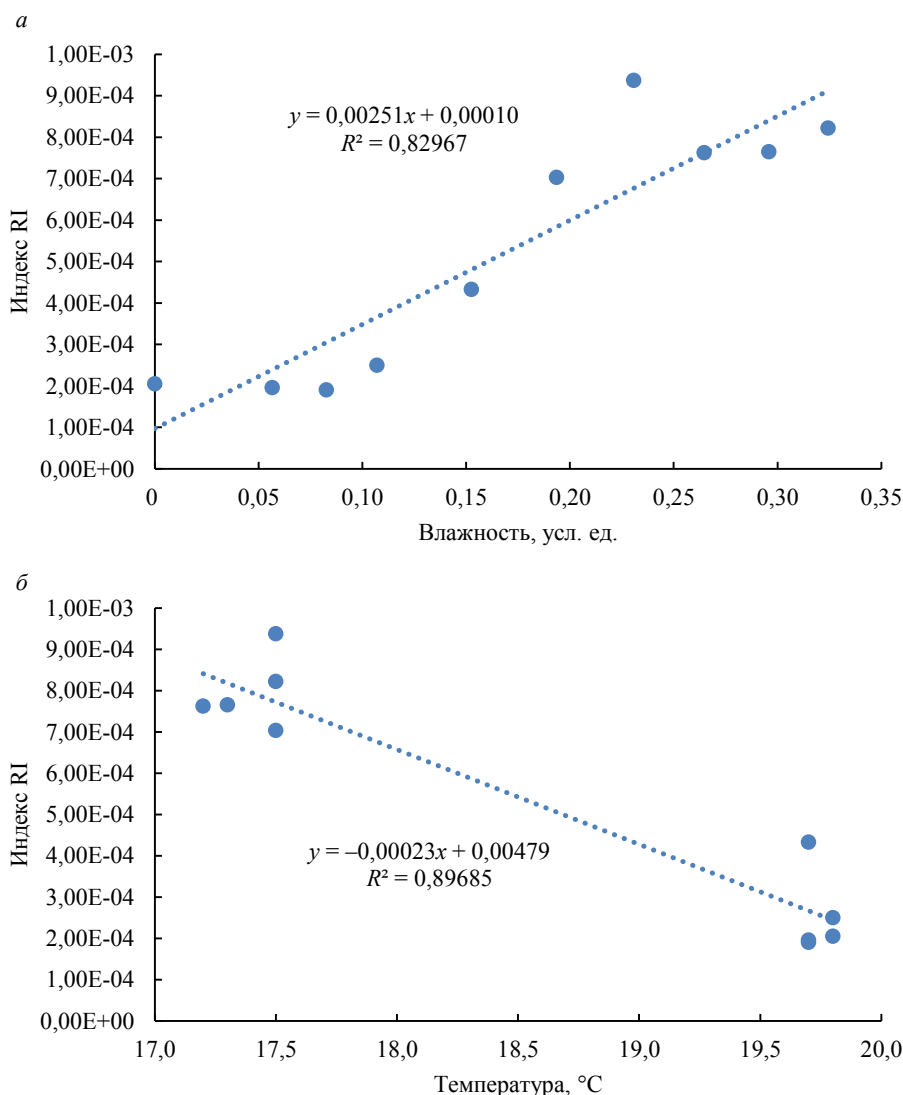


Рисунок 3. Графики (и тренды) индекса RI при естественном свете в зависимости от: а – влажности; б – температуры

Figure 3. Graphs (and trends) of the RI index in natural light depending on: а – humidity; б – temperature

В выполненном исследовании в качестве эталонных образцов использованы: **белый** (dEWh_1 – естественный свет и dEWh_2 – УФ-свет) и **черный** (dEBI_1 – естественный свет и dEBI_2 – УФ-свет). Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Анализ результатов обработки.

Методика RGB. При естественном свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (на рис. 3 представлены графики только индекса RI) в зависимости от температуры и влажности.

Приравнивая аналитические зависимости индекса $RI(T)$ и $RI(w)$ через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -10,913w + 20,391; \quad w = -0,092T + 1,869.$$

Аналогичная обработка через индекс SI дает следующие результаты:

$$T = -13,456w + 20,863; \quad w = -0,074T + 1,555.$$

При УФ-свете в «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров также построены графики (и тренды) индексов (SI и RI) (аналоги графиков на рис. 3) в зависимости от температуры и влажности.

Приравнивая аналитические зависимости индекса $RI(T)$ и $RI(w)$ через линейные функции аппроксимации от температуры и влажности имеем связь между этими физическими параметрами:

$$T = -11,501w + 20,534; \quad w = -0,087T + 1,786.$$

Аналогичная обработка через индекс SI дает следующие результаты:

$$T = -9,535w + 20,194; \quad w = -0,105T + 2,118.$$

Методика Lab. В «нулевом» приближении поиска взаимосвязи параметров построены графики (и тренды) показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры и влажности (см. рис. 4 и 5 и введенные ранее обозначения).

Приравнивая соответствующие значения ΔE_{abi} через функции аппроксимации от температуры и влажности, имеем связь между этими физическими параметрами.

При естественном свете (эталон – белый):

$$T = -11,144w + 20,474; \quad w = -0,089T + 1,837.$$

При естественном свете (эталон – черный):

$$T = -11,049w + 20,457; \quad w = -0,091T + 1,852.$$

При УФ свете (эталон – белый):

$$T = -10,936w + 20,438; \quad w = -0,091T + 1,869.$$

При УФ свете (эталон – черный):

$$T = -10,444w + 20,354; \quad w = -0,096T + 1,949.$$

В табл. 5 и 6 представлены рассчитанные отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов

экспериментальных функций. Табл. 5 соответствует применению естественного света, а табл. 6 – использованию УФ-света.

Для естественного света можно отметить следующее.

Зависимость температуры от влажности:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для черного эталона;
- абсолютно выбиваются результаты для индекса SI.

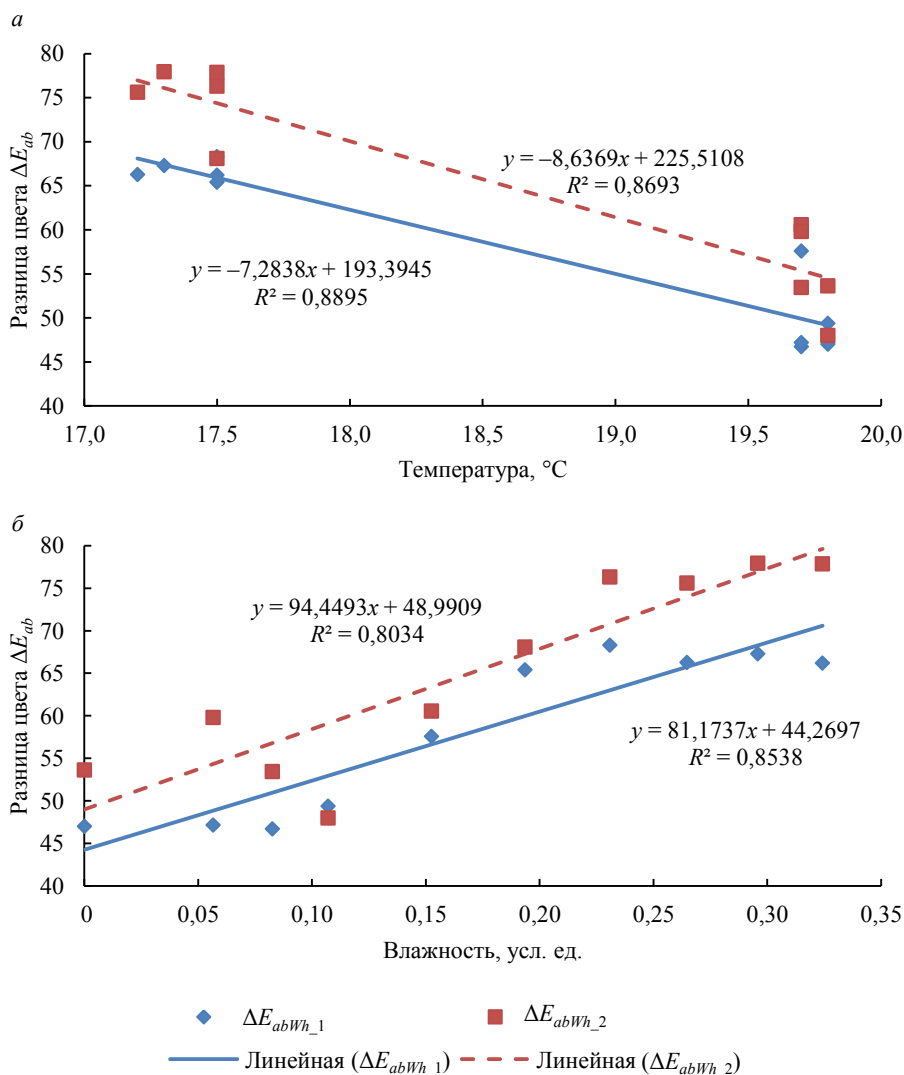


Рисунок 4. Расчетные значения показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры – а и влажности – б образцов при белом эталоне

Figure 4. Calculated values of the ΔE_{abi} indicator depending on the temperature – а and humidity – б of samples with a white standard

Зависимость влажности от температуры:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI;
- остальные результаты чрезвычайно неудачные.

Для УФ-света можно отметить следующее.

Зависимость температуры от влажности:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона;
- результаты по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона менее удачны.

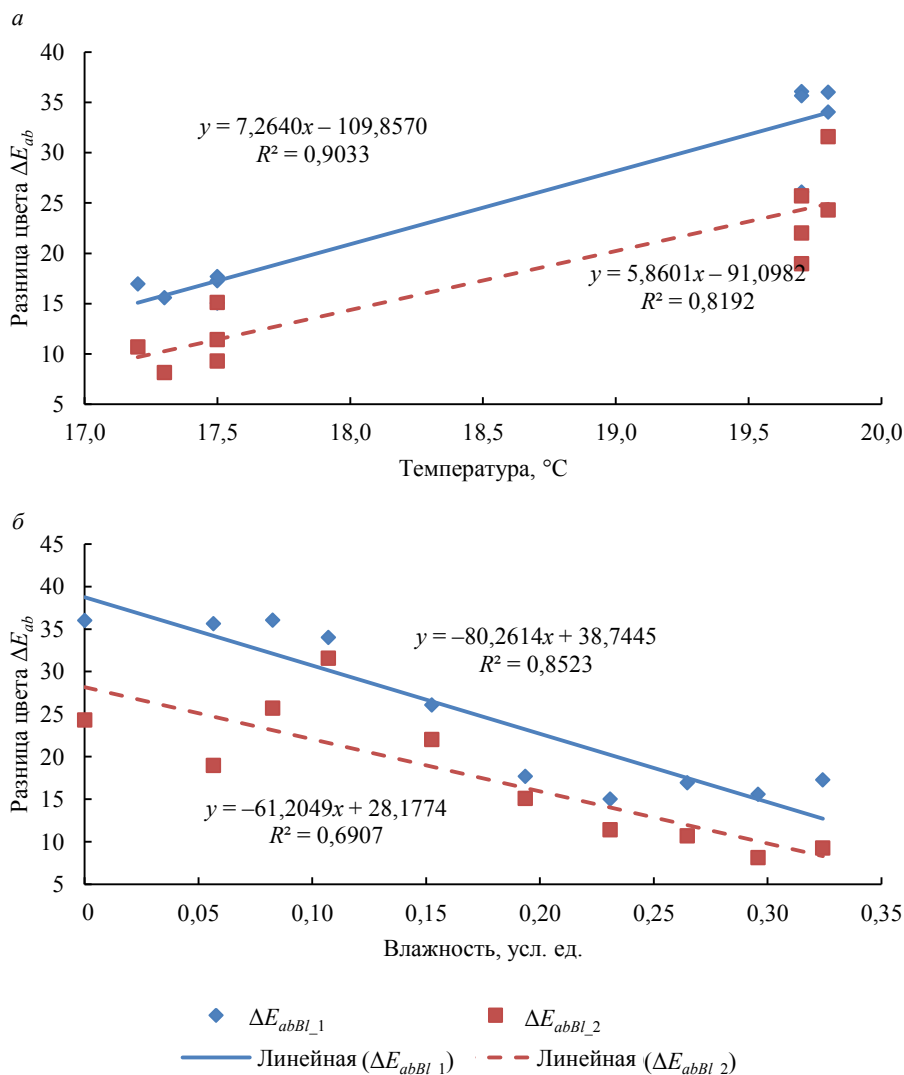


Рисунок 5. Расчетные значения показателя ΔE_{abi} в зависимости от температуры – а и влажности – б образцов при черном эталоне

Figure 5. Calculated values of the ΔE_{abi} indicator depending on the temperature – а and humidity – б of samples with a black standard

Зависимость влажности от температуры:

- минимальные отклонения имеют расчетные зависимости, полученные по RGB-методике для индекса RI и по Lab-методике для белого эталона;
- результаты по RGB-методике для индекса SI и по Lab-методике для черного эталона также менее удачны.

Таким образом, в условиях естественного освещения (как наиболее реального) при анализе результатов аналогичных лабораторных и натурных экспериментов для описания зависимости температуры от влажности могут быть рекомендованы к использованию индекс RI и черный эталон в цветовых моделях RGB и Lab соответственно. В то же время для описания зависимости влажности от температуры можно использовать индекс SI в цветовой модели RGB. Кроме того, было бы весьма полезно повысить точность измерения температуры с целью более аккуратного математического описания результатов измерений.

Таблица 5. Отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при естественном свете

Table 5. Deviations of coefficients a and b of the calculated linear dependences $y = ax + b$ from the corresponding coefficients of the experimental function in natural light

Источник данных	Линейные зависимости	$\Delta a, \%$	$\Delta b, \%$
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$	–	–
RGB (RI)	$T = -10,913w + 20,391$	0,791 (7,8)	0,092 (0,5)
RGB (SI)	$T = -13,456w + 20,863$	3,334 (32,9)	0,564 (2,8)
Lab (белый)	$T = -11,144w + 20,474$	1,022 (10,1)	0,175 (0,9)
Lab (черный)	$T = -11,049w + 20,457$	0,927 (9,2)	0,158 (0,8)
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$	–	–
RGB (RI)	$w = -0,092T + 1,869$	0,014 (18,0)	0,245 (15,1)
RGB (SI)	$w = -0,074T + 1,555$	-0,004 (-5,1)	-0,069 (-4,3)
Lab (белый)	$w = -0,089T + 1,837$	0,011 (14,1)	0,213 (13,1)
Lab (черный)	$w = -0,091T + 1,852$	0,013 (16,7)	0,228 (14,0)

Представляется, что полученный результат дает определенные основания к проведению дальнейших исследований как в лабораторном масштабе с целью изучения динамики значений компонент цветовых моделей при изменении температуры поверхности пыления, так и непосредственно на объекте пыления с использованием БПЛА. В частности, в период пыления предстоит выполнить фотографирование поверхности хвостохранилища цифровой и инфракрасной камерами для измерения температуры различных участков поверхности и последующего анализа данных. В качестве эталонов для применения Lab-методики могут быть использованы самые светлые (сухие) и темные (влажные) участки объекта.

Выводы. В работе представлены результаты исследований по определению количественной взаимосвязи температуры и влажности материалов хвостов обогащения на базе анализа цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов посредством методик RGB и Lab. Используются пробы поверхностного слоя хвостохранилища АНОФ-2 (г. Апатиты, Мурманская область).

Рассмотрены два вида освещения: естественный и УФ-свет. В методике RGB проанализированы индексы насыщения и покраснения, в методике Lab использованы два эталона – белый и черный.

В качестве «нулевого» приближения исследована простейшая (линейная) аналитическая зависимость температуры от влажности и наоборот. Выполнено сравнение коэффициентов расчетных линейных зависимостей с соответствующими коэффициентами прямой обработки экспериментальных данных.

Показано, что при естественном освещении:

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике.

Таблица 6. Отклонения коэффициентов a и b расчетных линейных зависимостей $y = ax + b$ от соответствующих коэффициентов экспериментальной функции при УФ-свете

Table 6. Deviations of coefficients a and b of the calculated linear dependences $y = ax + b$ from the corresponding coefficients of the experimental function in UV light

Источник данных	Линейные зависимости	Δa , %	Δb , %
$T = aw + b$			
Эксперимент	$T = -10,122w + 20,299$	–	–
RGB (RI)	$T = -11,501w + 20,534$	1,378 (13,6)	0,235 (1,2)
RGB (SI)	$T = -9,535w + 20,194$	-0,587 (-5,8)	-0,105 (-0,5)
Lab (белый)	$T = -10,936w + 20,438$	0,814 (8,0)	0,139 (0,7)
Lab (черный)	$T = -10,444w + 20,354$	0,322 (3,2)	0,055 (0,3)
$w = aT + b$			
Эксперимент	$w = -0,078T + 1,624$	–	–
RGB (RI)	$w = -0,087T + 1,786$	0,009 (11,5)	0,162 (10,0)
RGB (SI)	$w = -0,105T + 2,118$	0,027 (34,6)	0,494 (30,4)
Lab (белый)	$w = -0,091T + 1,869$	0,013 (16,7)	0,245 (15,1)
Lab (черный)	$w = -0,096T + 1,949$	0,018 (23,1)	0,325 (20,0)

Продемонстрировано, что при УФ-свете:

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости температуры от влажности соответствуют использованию индекса насыщения в RGB-методике и черного эталона в Lab-методике;

– минимальные отклонения коэффициентов расчетной зависимости влажности от температуры соответствуют использованию индекса покраснения в RGB-методике и белого эталона в Lab-методике.

Указанные индексы и цвета эталонов могут быть рекомендованы при обработке подобных лабораторных и натуральных экспериментов.

Намечены пути дальнейших исследований в лабораторном и натурном масштабе. Использование цифровых изображений поверхности пляжа хвостохранилищ в перспективе может сделать процедуру принятия решений по нанесению реагентов более оперативной и эффективной.

Приложение

Описание программы для анализа фотоизображения

Назначение программы: считать количество пикселей фотоизображения и цвет этих пикселей, вывести необходимую информацию об изображении в формате цветковых моделей RGB и Lab после обработки данных.

Выходная информация: количество пикселей, значения цветковых компонент в форматах RGB, XYZ, Lab и другие параметры.

Загрузка и настройка изображения.

Загрузка изображения в Unity и настройка его для анализа. Для этого изменяем исходный тип изображения на Sprite (2D and UI), что позволяет Unity воспринимать изображение не просто как картинку, а как объект, с которым можно взаимодействовать.

Размещение изображения в рабочей зоне, которая является объектом типа Raw Image с соответствующим компонентом.

Код программы.

Программа написана по принципам объектно-ориентированного программирования (ООП). Программа логически разбита на части.

1. Анализ изображения и счет пикселей.

Используя метод GetPixels в классе Texture 2D, прочитываем цвет всех пикселей изображения и их количество. Получаем список цветов и находим его длину с помощью метода Length. Далее просматриваем все элементы списка и ищем цвет каждого пикселя, добавляя его в новый массив.

2. Центральное тело.

С использованием встроенного в Unity метода массив цветов переводим из формата Unity Color в HEX.

По формулам [45] переводим цвет в формате HEX в формат RGB и вычисляем среднее арифметическое по каждой компоненте.

3. Вспомогательные классы и методы.

Реализуем два класса: класс XYZ, который принимает цвет в формате RGB, и класс Lab, который принимает цвет в формате XYZ.

Класс XYZ: в классе созданы три поля x, y, z, которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает цвет в RGB и по формулам [46] преобразует компоненты в цвет в формате X, Y, Z и записывает их в поля объекта.

Класс Lab: в классе Lab имеется три поля L, a, b, которые хранят соответствующие компоненты. В классе присутствует конструктор, который принимает в себя цвет в формате XYZ и по формулам [47] преобразует компоненты в цвет в формате L, a, b и записывает их в поля объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Zh. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives // International Journal of Coal Science & Technology. 2019. Vol. 6. P. 320–333. URL: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5> (дата обращения: 30.03.2023).
2. Эдвардс Меган. Беспилотные летательные аппараты в горнодобывающей промышленности: пер. с англ. С. С. Верхозина. URL: <https://zolotodb.ru/article/11132> (дата обращения: 30.03.2023).
3. Преимущества аэрофотосъемки с помощью БПЛА Геоскан. URL: <https://www.geoscan.aero/ru/application/mining> (дата обращения: 30.03.2023).
4. Как дроны меняют горнодобывающую промышленность. URL: <https://4vision.ru/articles/kak-drony-menyayut-gornodobyvayushuyu-promyshlennost.html> (дата обращения: 30.03.2023).
5. Противовоздушный промышленный квадрокоптер Elios 2 создает трехмерные модели подземных горных выработок. URL: <https://www.pergam.ru/articles/mining-drone.htm> (дата обращения: 30.03.2023).
6. Крупин А. Дрон на производстве: как промышленность использует беспилотный транспорт. URL: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/204389/2020-02-03/2020-w06/dron-proizvodstve-kak-promyshlennost-ispolzuet-bespilotnyy-transport> (дата обращения: 30.03.2023).
7. Витковская С. Дроны в карьер. URL: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karier> (дата обращения: 30.03.2023).
8. Асташина О. Горнодобывающая промышленность: преимущества применения дронов сегодня и перспективы на ближайшее время. URL: <https://dji-blog.ru/naznachenie/promyshlennye/gornodobyvajushhaja-promyshlennost-preimushhestva-primeneniya-dronov-segodnja-i-perspektivy-nablizhajshee-vremja.html> (дата обращения: 30.03.2023).
9. Картирование месторождений с помощью БПЛА. URL: <https://dprom.online/unsolution/kartirovanie-mestorozhdenij-s-pomoshhyu-bpla/> (дата обращения: 30.03.2023).
10. Бойко А. Области применения беспилотников. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> (дата обращения: 30.03.2023).
11. Получение данных для горнодобывающей отрасли от этапа добычи до этапа отгрузки потребителю: тенденции цифровизации в горнодобывающей отрасли. URL: <https://www.consultdss.ru/digitalization-in-mining/> (дата обращения: 23.10.2021).

12. Репина И. А., Варенцов М. И., Чечин Д. Г., Артамонов А. Ю., Бодунков Н. Е., Калягин М. Ю., Живоглотов Д. Н., Шевченко А. М., Варенцов А. И., Куксова Н. Е., Степаненко В. М., Шестакова А. А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // *Иноватика и экспертиза*. 2020. Вып. 2(30). С. 20–39. URL: <https://www.inno-exp.ru/archive/30/20-39.pdf> (дата обращения: 30.03.2023).
13. Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., Heuff D. A Methodology to monitor airborne PM10 dust particles using a small unmanned aerial vehicle // *Sensors*. 2017. Vol. 17(2). 343. DOI: 10.3390/s17020343
14. Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil // *International Journal of Remote Sensing*. 1997. Vol. 18. P. 2835–2852.
15. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typic soil colour of an arid environment // *Remote Sensing of Environment*. 1998. Vol. 66. P. 17–28.
16. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments // *International Journal of Remote Sensing*. 2005. Vol. 26. No. 24. P. 5475–5492.
17. Валева А. А., Александрова А. Б., Копосов Г. Ф. Цветовые характеристики лесных почв Волжско-камской лесостепи // *Ученые записки Казанского университета. Естественные науки*. 2015. Т. 157. Кн. 3. С. 58–66.
18. Кириллова Н. П., Силева Т. М. Анализ цвета почв с использованием цифровой камеры // *Вестник Московского университета. Сер. 17. Почвоведение*. 2017. № 1. С. 16–23.
19. Dean C., Warner T. A., Mcgraw J. B. Suitability of the DCS460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000. Vol. 55. P. 105–118.
20. King D. J. Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications // *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1995. Vol. 21. P. 245–273.
21. Yam K. L., Papadakis S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing colour of food samples // *Journal of Food Engineering*. 2004. Vol. 61. P. 137–142.
22. Sena D. G., Pinto F. A. C., Queiroz D. M., Viana P. A. Fall armyworm damaged maize plant identification using digital images // *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 85. P. 449–454.
23. Wang K., Kangas J. A. Character location in scene images from digital camera // *Pattern Recognition*. 2003. Vol. 36. P. 2287–2299.
24. Hinkler J., Pedersen S. B., Rasch M., Hansen B. U. Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23. P. 4669–4682.
25. Ачасов А. Б., Бидолах Д. И. Использование материалов космической и наземной цифровой фотосъемки для определения содержания гумуса в почвах // *Почвоведение*. 2008. № 3. С. 280–286.
26. Булыгин С. Ю., Бидолах Д. И., Лисецкий Ф. Н. Оценка гумусированности почв путем обработки их цифровых фотоизображений // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2011. Т. 16. № 15. С. 154–159.
27. Robertson E. A. G., Campbell D. J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure // *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997. Vol. 68. No 4. P. 291–296.
28. Пузаченко Ю. Г., Пузаченко М. Ю., Козлов Д. Н., Алещенко Г. М. Анализ строения почвенного профиля на основе цифровой цветной фотографии // *Почвоведение*. 2004. № 2. С. 133–146.
29. Adderley W. P., Simpson I. A., Davidson D. A. Colour description and quantification in mosaic images of soils thin sections // *Geoderma*. 2002. Vol. 108. No. 3–4. P. 181–195.
30. León K., Mery D., Pedreschi F., León J. Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images // *Food Research International*. 2006. Vol. 39. No. 10. P. 1084–1091.
31. Melville M. D., Atchinson G. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space // *Journal of Soil Science*. 1985. Vol. 36. No. 4. P. 495–512.
32. Warner W. S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photog-raphy // *Soil and Tillage Research*. 1995. Vol. 34. No. 3. P. 187–197.
33. Цырятьева А. В., Тюкавкина В. В. Оценка фотокаталитической активности титаносиликатных порошков синтетического происхождения // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2021. Т. 12. № 2(5). С. 273–278.
34. Tyukavkina V. V., Shchelokova E. A., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. TiO₂–SiO₂ nanocomposites from technological wastes for self-cleaning cement composition // *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 44. P. 102648.
35. Shchelokova E. A., Tyukavkina V. V., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. Synthesis and characterization of SiO₂–TiO₂ nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites // *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 283. P. 122769.
36. Webster M. A., Mollon J. D. Adaptation and the color statistics of natural images // *Vision Research*. 1997. Vol. 37. No. 23. P. 3283–3298.

37. Viscarra Rossel R. A., Walter C. Towards a quantitative assessment of field soil organic carbon using proximally sensed digital imagery // In 17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002. No. 48. Paper no. 1523.

38. Viscarra Rossel R. A., Walter C., Fouad Y. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon // Precision Agriculture. 2003. P. 697–703.

39. Селянкин В. В., Скороход С. В. Анализ и обработка изображений в задачах компьютерного зрения. Таганрог: ЮФУ, 2015. 82 с.

40. Постнов К. В. Компьютерная графика. М.: НИУ МГСУ, 2012. 289 с.

41. RGB. URL: <https://media.contented.ru/glossary/rgb/> (дата обращения: 30.03.2023).

42. Различия цветовых моделей RGB, CMYK, HSB. URL: <https://accent.su/blog/razlichiya-tsvetovyh-modelej-rgb-cmyk-hsb/> (дата обращения: 30.03.2023).

43. Аппаратно-независимые цветовые модели. URL: http://vtk34.narod.ru/putilina_rastrgraphic/lek/6/index.htm (дата обращения: 30.03.2023).

44. CIE 15: 2004. Technical report. Colorimetry. 3rd ed. Vienna: 2004. 72 p. DOI: <https://ia802802.us.archive.org/23/items/gov.law.cie.15.2004/cie.15.2004.pdf>

45. Конвертер RGB в HEX. URL: <https://wizlogo.com/ru/rgb-to-hex> (дата обращения: 30.03.2023)

46. Колориметрическая система хyz. URL: <https://unick-soft.ru/article.php?id=32> (дата обращения: 30.03.2023)

47. О цветовых пространствах. URL: <https://habr.com/ru/articles/181580/> (дата обращения: 30.03.2023).

Поступила в редакцию 21 октября 2022 года

Сведения об авторах:

Амосов Павел Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Горячев Андрей Александрович – младший научный сотрудник Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: a.goryachev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

Малодушев Кирилл Андреевич – студент Мурманского Арктического государственного университета (филиал в г. Апатиты). E-mail: kirillmalodushev@gmail.com

Макаров Дмитрий Викторович – доктор технических наук, директор Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: mdv_2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Маслобоев Владимир Алексеевич – доктор технических наук, научный руководитель Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

Searching for the relationship between the temperature and humidity of tailings material by processing digital photographs of laboratory experiments and color models

Pavel V. Amosov¹, Andrei A. Goriachev¹, Kirill A. Malodushev², Dmitrii V. Makarov¹, Vladimir A. Masloboev¹

¹ Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia.

² Murmansk Arctic State University (branch), Apatity, Russia.

Abstract

Relevance. Tailings beach surface dries and deflates, which intensifies the dusting process, results in ecosystems disruption on the adjacent territories, and adversely impacts health of population. The use of digital photographs, including those obtained with the help of unmanned aerial vehicles, seems to be promising in terms of reagents application simplification and dusting minimization.

Research objective is to determine the quantitative relationship between the temperature and humidity of tailings materials by analyzing the digital photographs of laboratory experiments using RGB and Lab methods.

Methods of research. Standard equipment was used to perform a laboratory experiment to determine the temperature and humidity of tailing dump surface layer samples. Digital photographs were taken in natural light and UV light. At the first stage, the images were processed to obtain the values of the components of two color models, RGB (redness and saturation indices were calculated)

and Lab (the color difference index was calculated, two standards of black and white were used). At the second stage, as a “zero” approximation, the simplest (linear) analytical dependence between temperature and humidity was studied.

Results and analysis. The coefficients of calculated linear dependences are compared with the corresponding coefficients of direct experimental data processing. It is shown that in natural light: the smallest deviations for the dependence of temperature on humidity correspond to the redness index in the RGB method and the black standard in the Lab method; the smallest deviations for the dependence of humidity on temperature correspond to the saturation index in the RGB method and the black standard in the Lab method. It is shown that in UV light: the smallest deviations for the dependence of temperature on humidity correspond to the saturation index in the RGB method and the black standard in the Lab method; the smallest deviations of the dependence of humidity on temperature correspond to the redness index in the RGB method and the white standard in the Lab method.

Conclusions and scope. The mentioned indices and colors of standards can be recommended when processing similar laboratory experiments and natural studies directly on the dusting site.

Keywords: tailings; tailing storage; temperature; humidity; ecosystem disruption; digital photograph; RGB color model; model Lab; dusting; beach surface; UAV.

The research was carried out within the R&D theme no. 1021051803680-5 “Transformation processes of natural and technogenic systems in the conditions of climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (by the example of the Murmansk region)” and supported by the RFBR grant 19-05-50065 Microworld “Integrated assessment of the impact made by microparticles in emissions from Murmansk mining enterprises and steelworks on ecosystems and Arctic population health status”.

REFERENCES

1. Ren H., Zhao Y., Xiao W., Hu Zh. A review of UAV monitoring in mining areas: current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2019; 6: 320–333. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40789-019-00264-5> [Accessed 30 March 2023].
2. Edwards M. *Unmanned aerial vehicles in mining*. Transl. from English. (In Russ.) Available from: <https://zolotodb.ru/article/11132> [Accessed 30 March 2023].
3. *Advantages of aerial survey with UAV Geoscan*. (In Russ.) Available from: <https://www.geoscan.aero/ru/application/mining> [Accessed 30 March 2023].
4. *The way drones change the mining industry*. (In Russ.) Available from: <https://4vision.ru/articles/kak-dronny-menyayut-gornodobyvayuschuyu-promyshlennost.html> [Accessed 30 March 2023].
5. *Shock-proof industrial quadrocopter drone Elios 2 creates 3D models of underground workings*. (In Russ.) Available from: <https://www.pergam.ru/articles/mining-drone.htm> [Accessed 30 March 2023].
6. Krupin A. *A drone at the production site: the way industry uses unmanned vehicles*. (In Russ.) Available from: <https://www.comnews.ru/digital-economy/content/204389/2020-02-03/2020-w06/dron-proizvodstve-kak-promyshlennost-ispolzuet-bespilotnyy-transport> [Accessed 30 March 2023].
7. Vitkovskaia S. *Drones in open pits*. (In Russ.) Available from: <https://www.vedomosti.ru/partner/articles/2019/12/06/817974-droni-karer> [Accessed 30 March 2023].
8. Astashina O. *Mining industry: present-day advantages of drones and prospects for the nearest future*. (In Russ.) Available from: <https://dji-blog.ru/naznachenie/promyshlennye/gornodobyvajushhaja-promyshlennost-preimushhestva-primeneniya-dronov-segodnja-i-perspektivy-na-blizhajshee-vremja.html> [Accessed 30 March 2023].
9. *Mapping deposits with UAV*. (In Russ.) Available from: <https://dprom.online/unsolution/kartirovanie-mestorozhdenij-s-pomoshhyu-bpla/> [Accessed 30 March 2023].
10. Boiko A. *Uses of unmanned vehicles*. (In Russ.) Available from: <http://robotrends.ru/robotpedia/oblasti-primeneniya-bespilotnikov> [Accessed 30 March 2023].
11. *Obtaining data for mining industry starting with the stage of production and ending with dispatch to the consumer: digitalization trends in the mining industry*. (In Russ.) Available from: <https://www.consultdss.ru/digitalization-in-mining/> [Accessed 30 March 2023].
12. Repina I. A., Varentsov M. I., Chechin D. G., Artamonov A. Iu., Bodunkov N. E., Kaliagin M. Iu., Zhivoglotov D. N., Shevchenko A. M., Varentsov A. I., Kuksova N. E., Stepanenko V. M., Shestakova A. A. Application of unmanned aircraft for studying of the atmospheric boundary layer. *Innovatika i ekspertiza = Innovatics and Expert Examination*. 2020; 2(30): 20–39. (In Russ.) Available from: <https://www.inno-exp.ru/archive/30/20-39.pdf> [Accessed 30 March 2023].
13. Alvarado M., Gonzalez F., Erskine P., Cliff D., Heuff D. A Methodology to monitor airborne PM₁₀ dust particles using a small unmanned aerial vehicle. *Sensors*. 2017; 17(2): 343. Available from: doi: 10.3390/s17020343

14. Madeira J., Bedidi A., Cervelle B., Pouget M., Flay N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*. 1997; 18: 2835–2852.
15. Mathieu R., Pouget M., Cervelle B., Escadafal R. Relationships between satellite-based radiometric indices simulated using laboratory reflectance data and typical soil colour of an arid environment. *Remote Sensing of Environment*. 1998; 66: 17–28.
16. Levin N., Ben-Dor E., Singer A. A digital camera as a tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. *International Journal of Remote Sensing*. 2005; 26(24): 5475–5492.
17. Valeeva A. A., Aleksandrova A. B., Kuposov G. F. Colour characteristics of the forest soils in the Volga–Kama forest-steppe region. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Estestvennye nauki = Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series*. 2015; 157(3): 58–66. (In Russ.)
18. Kirillova N. P., Sileva T. M. Colometric analysis of soils using digital cameras. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 17. Pochvovedenie = Bulletin of the Moscow University. Series 17. Soil Science*. 2017; 1: 16–23. (In Russ.)
19. Dean C., Warner T. A., McGraw J. B. Suitability of the DCS460c colour digital camera for quantitative remote sensing analysis of vegetation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2000; 55: 105–118.
20. King D. J. Airborne multispectral digital camera and video sensors: a critical review of system designs and applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1995; 21: 245–273.
21. Yam K. L., Papadakis S. E. A simple digital imaging method for measuring and analyzing colour of food samples. *Journal of Food Engineering*. 2004; 61(1): 137–142.
22. Sena D. G., Pinto F. A. C., Queiroz D. M., Viana P. A. Fall armyworm damaged maize plant identification using digital images. *Biosystems Engineering*. 2003; 85: 449–454.
23. Wang K., Kangas J. A. Character location in scene images from digital camera. *Pattern Recognition*. 2003; 36: 2287–2299.
24. Hinkler J., Pedersen S. B., Rasch M., Hansen B. U. Automatic snow cover monitoring at high temporal and spatial resolution, using images taken by a standard digital camera. *International Journal of Remote Sensing*. 2002; 23: 4669–4682.
25. Achasov A. B., Bidolakh D. I. The use of space and ground digital photography for determining the humus content in soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2008; 3: 280–286. (In Russ.)
26. Bulygin S. Iu., Bidolakh D. I., Lisetskii F. N. Evaluation of soil humus content by treatment of their digital photographic images. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki = Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences*. 2011; 16(15): 154–159. (In Russ.)
27. Robertson E. A. G., Campbell D. J. Simple, low-cost image analysis of soil pore structure. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1997; 68(4): 291–296.
28. Puzachenko Iu. G., Puzachenko M. Iu., Kozlov D. N., Aleshchenko G. M. Soil structure analysis with the use of digital color images. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2004; 2: 133–146. (In Russ.)
29. Adderley W. P., Simpson I. A., Davidson D. A. Colour description and quantification in mosaic images of soils thin sections. *Geoderma*. 2002; 108(3–4): 181–195.
30. León K., Mery D., Pedreschi F., León J. Color measurement in $L^*a^*b^*$ units from RGB digital images. *Food Research International*. 2006; 39(10): 1084–1091.
31. Melville M. D., Atchinson G. Soil colour: its measurement and its designation in models of uniform colour space. *Journal of Soil Science*. 1985; 36(4): 495–512.
32. Warner W. S. Mapping a three-dimensional soil surface with hand-held 35 mm photography. *Soil and Tillage Research*. 1995; 34(3): 187–197.
33. Tsyriatieva A. V., Tiukavkina V. V. Evaluation of photocatalytic activity of titanosilicate powders of synthetic origin. *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Kola Science Centre RAS*. 2021; 12; 2(5): 273–278. (In Russ.)
34. Tyukavkina V. V., Shchelokova E. A., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. TiO₂–SiO₂ nanocomposites from technological wastes for self-cleaning cement composition. *Journal of Building Engineering*. 2021; 44: 102648.
35. Shchelokova E. A., Tyukavkina V. V., Tsyryatyeva A. V., Kasikov A. G. Synthesis and characterization of SiO₂–TiO₂ nanoparticles and their effect on the strength of self-cleaning cement composites. *Construction and Building Materials*. 2021; 283: 122769.
36. Webster M. A., Mollon J. D. Adaptation and the color statistics of natural images. *Vision Research*. 1997; 37(23): 3283–3298.
37. Viscarra Rossel R. A., Walter C. Towards a quantitative assessment of field soil organic carbon using proximally sensed digital imagery. In: *17th World Congress of Soil Science, Bangkok, Thailand, 14–21 August 2002*. No. 48. Paper no. 1523.
38. Viscarra Rossel R. A., Walter C., Fouad Y. Assessment of two reflectance techniques for the quantification of field soil organic carbon. *Precision Agriculture*. 2003; 697–703.
39. Seliainkin V. V., Skorokhod S. V. *Analysis and editing of images in the computer vision problems: training manual*. Taganrog: SFU Publishing; 2015. (In Russ.)

40. Postnov K. V. *Computer-generated imagery*. Moscow: NRU MUSE Publishing; 2012. (In Russ.)
41. *RGB*. (In Russ.) Available from: <https://media.contented.ru/glossary/rgb/> [Accessed 30 March 2023].
42. *Differences between the color models of RGB, CMYK, HSB*. (In Russ.) Available from: <https://accent.su/blog/razlichiya-tsvetovyh-modelej-rgb-cmyk-hsb/> [Accessed 30 March 2023].
43. *Device independent color models*. (In Russ.) Available from: http://vtk34.narod.ru/putilina_rastrgraphic/lek/6/index.htm [Accessed 30 March 2023].
44. *CIE 15: 2004. Technical report. Colorimetry. 3rd ed.* Vienna: 2004. 72 p. Available from: doi: <https://ia802802.us.archive.org/23/items/gov.law.cie.15.2004/cie.15.2004.pdf>
45. *RGB to HEX converter*. (In Russ.) Available from: <https://wizlogo.com/ru/rgb-to-hex> [Accessed 30 March 2023].
46. *Color measuring system xyz*. (In Russ.) Available from: <https://unick-soft.ru/article.php?id=32> [Accessed 30 March 2023].
47. *Regarding color spaces*. (In Russ.) Available from: <https://habr.com/ru/articles/181580/> [Accessed 30 March 2023].

Received 21 October 2022

Information about the authors:

Pavel V. Amosov – PhD (Engineering), leading researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: p.amosov@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7725-6261>

Andrei A. Goriachev – junior researcher, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: a.goriachev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

Kirill A. Malodushev – student, Murmansk Arctic State University (Apatity branch). E-mail: kirillmalodushev@gmail.com

Dmitrii V. Makarov – DSc (Engineering), Director, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: mdv_2008@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Vladimir A. Masloboev – DSc (Engineering), Head of research, Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS. E-mail: v.masloboev@ksc.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-921x>

Для цитирования: Амосов П. В., Горячев А. А., Малодушев К. А., Макаров Д. В., Маслобоев В. А. Поиск взаимосвязи температуры и влажности материала хвостов обогащения на базе обработки цифровых фотоснимков лабораторных экспериментов и цветовых моделей // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 66–85. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

For citation: Amosov P. V., Goriachev A. A., Malodushev K. A., Makarov D. V., Masloboev V. A. Searching for the relationship between the temperature and humidity of tailings material by processing digital photographs of laboratory experiments and color models. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 66–85 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-66-85

Совершенствование технологии обогащения медно-цинковой руды колчеданного месторождения Уральского типа

Мамонов С. В.^{1,2*}, Волкова С. В.¹, Чинова Н. Б.¹,
Хисамова А. С.¹, Горайчук П. К.¹

¹АО «Уралмеханобр», г. Екатеринбург, Россия

²Технический университет УГМК, г. Верхняя Пышма, Россия

*e-mail: mamonov_sv@umbr.ru

Реферат

Введение и цель работы. Медно-цинковые руды колчеданных месторождений Уральского типа являются труднообогатимыми. Трудности в обогащении данных руд связаны с особенностями их вещественного состава: тонкая зернистость и эмульсионная вкрапленность рудных минералов друг в друге, наличие большого количества флотационно-активного пирита, высокое содержание тонкодисперсного и субмикроскопического золота в сульфидах и др. При переработке колчеданных руд на обогатительных фабриках в медные концентраты извлекается 83–91 % меди и 10–45 % золота, в цинковые концентраты извлекается 46–78 % цинка и 5–15 % золота. Повышение технологических показателей переработки руд колчеданных месторождений является перспективной и актуальной задачей.

Методология проведения исследований заключалась в изучении вещественного состава медно-цинковой колчеданной руды посредством количественного химического анализа; химического фазового анализа на формы соединений меди, цинка, золота и серебра; минералогического анализа. Технологические исследования выполнены флотационными и гравитационными методами с применением центробежного концентратора и концентрационного стола.

Выводы. При обогащении медно-цинковой руды колчеданного месторождения в условиях обогатительной фабрики установлен эффект циркуляционной концентрации золота в цикле доизмельчения грубого медного концентрата. Результатами исследований по центробежной концентрации золота в центробежном концентраторе с последующей перемешкой его тяжелой фракции на концентрационном столе показана возможность получения гравитационного продукта с массовой долей золота до 200 г/т при его операционном извлечении до 29 %. Отмечено, что комплексная флотационно-гравитационная технология обогащения медно-цинковой руды позволит увеличить сквозное извлечение золота в товарную продукцию более чем на 1,5 %. Применение в технологии флотации медно-цинковой колчеданной руды сочетания бутилового ксантогената калия с реагентом-коллектором ФРИМ-2920 способствует увеличению извлечения меди и золота в медный концентрат на 0,87 % и 3,22 % соответственно, а цинка в цинковый концентрат – на 0,4 %. Увеличение температуры пульпы в цикле цинковой флотации до 40–45 °С и возврат концентрата контрольной цинковой флотации и хвостов первой перемешанной цинковой флотации во II основную цинковую флотацию позволяет увеличить массовую долю цинка в цинковом концентрате с 48,5 до 51,1 % при одновременном увеличении извлечения цинка в цинковый концентрат с 62,6 до 65,6 %.

Ключевые слова: медь; цинк; золото; извлечение; медно-цинковая руда; колчеданное месторождение; центробежная концентрация; флотация; ФРИМ-2920; тепловое кондиционирование.

Введение. В металлогенических зонах Южного и Среднего Урала выявлено более 20 % балансовых запасов меди и цинка России. Эти промышленно ценные металлы в сырьевой базе горнорудных предприятий Урала представлены

медными и медно-цинковыми месторождениями в основном колчеданного типа [1]. Среди основных промышленных типов колчеданных месторождений можно выделить: Гайское, Учалинское, Ново-Учалинское, Узельгинское, Западно-Озерное, Сафьяновское, Октябрьское, Юбилейное, Подольское, Ново-Шемурское и др. [1–3], (*Методические рекомендации по применению Классификации запасов к месторождениям медных руд. М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2005. 44 с.; Методические рекомендации по применению Классификации запасов к месторождениям свинцовых и цинковых руд. М.: Министерство природных ресурсов Российской Федерации, 2005. 43 с.*)

Внутреннее строение колчеданных рудных тел характеризуется сочетанием руд сплошных (массовая доля серы в руде более 35 %) и вкрапленных (массовая доля серы в руде менее 35 % (*Методические рекомендации по применению Классификации запасов к месторождениям медных руд...*)) текстур. Тела сплошных руд обычно имеют четкие геологические границы; вкрапленные руды, как правило, связаны постепенными переходами со слабо минерализованными вмещающими породами. Существенная особенность сплошных (массивных) руд – тонкозернистость, нередко переходящая в эмульсионную вкрапленность, что осложняет процесс их обогащения и получения высоких технологических показателей.

Сложность обогащения данных руд также вызвана наличием флотационно-активного пирита вследствие активации колломорфных, корродированных и других модификаций его тонких зерен катионами меди и продуктами окисления вторичных минералов меди [4].

Практика работы действующих обогатительных комбинатов показывает, что при переработке сплошных колчеданных руд медные концентраты получают с массовой долей меди 17–20 % и извлечением меди в них 83–91 %, а цинковые концентраты с массовой долей цинка 48–51 % и извлечением цинка в них 46–78 %.

Относительно драгметаллов отмечено, что золото уральских колчеданных руд мелкое и тонкое [5–7], присутствует в двух основных видах: 1) микровключения (1–100 мкм) собственных минералов в сульфидах (самородное золото, обычно низкопробное, и теллуриды, реже другие сложные соединения золота); 2) «невидимое» (тонкодисперсное, субмикроскопическое) золото в сульфидах.

Для колчеданных руд распределение золота в продуктах флотации пропорционально в основном извлечению пирита и других сульфидов и составляет, %: 10–45 – в медный концентрат; 5–15 – в цинковый; 40–90 – в пиритный; при содержании в них золота, г/т: 3–8; 1,5–2,0; 0,8–1,5 [4].

Повышение технологических показателей переработки руд колчеданных месторождений является в настоящее время перспективной и актуальной задачей, решением которой может стать совершенствование существующих технологий за счет изменения технологических схем или изменения точек возврата промпродуктов; корректировки реагентных режимов с изменением и/или расширением номенклатуры реагентов (селективные собиратели, новые депрессоры и т. п.); увеличения степени раскрытия полиминеральных сростков; физико-механического воздействия на объект обогащения (тепловое и аэрационное кондиционирование пульпы, ультразвуковая десорбция, электрохимическое кондиционирование пульпы, растворов флотореагентов и технологической воды и т. п.); комбинации различных методов переработки в рамках одного объекта (комбинированные гравитационно-флотационные, магнитно-флотационные, флотационно-пиро- или гидрометаллургические технологии и т. п.).

Далее рассмотрены некоторые направления совершенствования технологии обогащения медно-цинковой руды одного из колчеданных месторождений Урала.

Результаты и обсуждение. Медно-цинковая руда колчеданного месторождения содержит: 2,17 % меди; 1,03 % цинка; 28,40 % серы; 25,43 % железа; 26,10 % диоксида кремния; 1,10 г/т золота и 5,70 г/т серебра.

Медь в руде на 87,1 % ассоциирована с первичными минералами, 84,8 % из которых связаны с халькопиритом и 2,3 % – с минералами блеклых руд. С вторичными сульфидами ассоциировано 8,8 % меди, с окисленными минералами – 4,1 %.

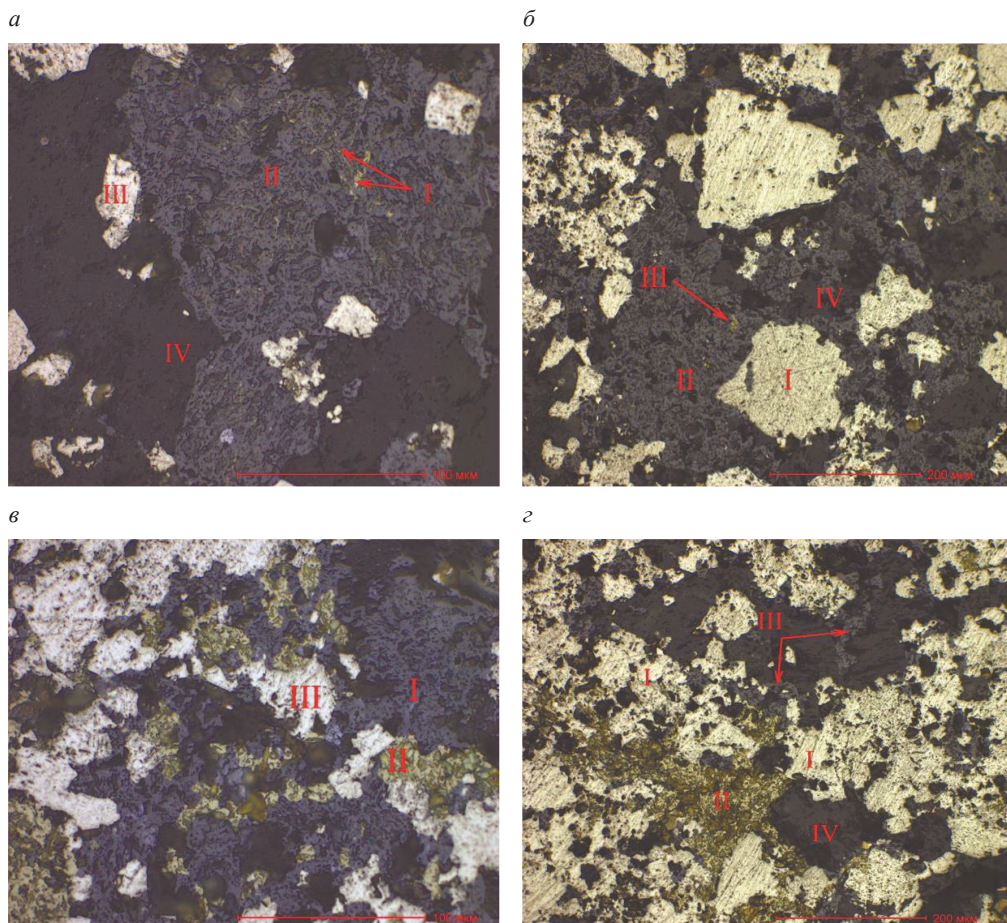


Рисунок 1. Характерный вид минеральных выделений медно-цинковой руды: *а* – эмульсионные вкрапления халькопирита (I) в сфалерите (II) и зерна пирита (III) в нерудной массе (IV); *б* – выделения пирита (I) и сфалерита (II), эмульсионные вкрапления халькопирита (III) в нерудной массе (IV); *в* – выделения сфалерита (I), находящиеся в сростании с зернами пирита (II) и халькопирита (II); *г* – вкрапления зерен пирита (I), халькопирита (II), сфалерита (III) и нерудного минерала (IV)

Figure 1. Characteristic appearance of copper-zinc ore mineral precipitates: *a* – emulsion impregnations of chalcopyrite (I) in sphalerite (II) and pyrite grains (III) in non-metallic mass (IV); *b* – precipitates of pyrite (I) and sphalerite (II), emulsion impregnations of chalcopyrite (III) in the non-metallic mass (IV); *v* – sphalerite (I) precipitates intergrown with pyrite (II) and chalcopyrite (II) grains; *z* – impregnations of grains of pyrite (I), chalcopyrite (II), sphalerite (III) and non-metallic mineral (IV)

Цинк в руде на 80,7 % связан с сульфидной формой (сфалеритом), на 8,7 % – с окисленными минералами, на 8,7 % – с гидроксидами железа и марганца и на 1,9 % – с сульфатами.

Из руды цианированием извлекается 13,7 % золота. Основная часть упорного золота находится в тесной ассоциации с сульфидами железа и меди, его доля составляет 77,1 %. При этом 68,8 % благородного металла, находящегося в ассоциации с пиритом и халькопиритом, является дисперсным. Массовая доля крупного золота, связанного с пиритом и халькопиритом, составляет 8,3 %. Концентрация золота, ассоциированного с нерудными минералами, а также с сульфидами и теллуридами, составляет по 4,6 %.

Доля серебра, извлекаемого цианированием из руды, составляет 13,5 %. Основная доля благородного металла приходится на серебро, связанное с нерудными минералами, и составляет 64,3 %; доля серебра, связанного с сульфидами меди и железа – 21,3 %; с сульфидами и теллуридами – 0,9 %.

По количеству слагающих сульфидов руда относится к вкрапленному типу. Промышленно-ценными минералами руды являются: халькопирит (5 %), теннантит (< 1 %), борнит (< 1 %) и сфалерит (1 %). Пирит (46 %) является преобладающим рудным минералом. Основные породообразующие минералы – пироксен (22 %) и кварц (18 %), в подчиненном количестве присутствуют амфиболы (6 %) и полевые шпаты (2 %).

Халькопирит (рис. 1, а, б) встречается в руде в виде ксеноморфных зерен и прожилков, распределяется по руде неравномерно, его выделения нередко заполняют межзерновое пространство зерен пирита и сфалерита, образуя вкрапления. Максимальный размер участков халькопирита, не содержащих видимые включения других рудных и нерудных минералов, не более $0,1 \times 0,08 \times 0,03$ мм.

Сфалерит (рис. 1, а, в) встречается в виде зерен изометричных неправильных форм. Его зерна образуют зернистые агрегаты. Максимальный размер участков сфалерита не более $0,15 \times 0,1 \times 0,08$ мм. Зернистые агрегаты встречаются в тонких и эмульсионных сростках с пиритом, халькопиритом и нерудными минералами. Нередко в сфалерите наблюдаются эмульсионные вкрапления халькопирита.

Пирит (рис. 1) встречается в виде зерен и их скоплений, образующих сплошные зернистые массы. Зерна пирита неправильной изометричной формы. Максимальный размер зерен пирита $0,08 \times 0,05 \times 0,03$ мм. Поверхность зерен дисульфида железа в большинстве случаев неровная. Включения пирита присутствуют в зернах сфалерита и нерудных минералах, образуя неравномерную тонкую вкрапленность. Крайне редко наблюдаются кристаллы пирита с кристаллографической огранкой. Зернистые массы пирита неправильной изометричной формы. Максимальный размер зернистого пирита не более $0,4 \times 0,3 \times 0,3$ мм. В межзерновом пространстве пирита часто наблюдаются халькопирит, сфалерит и нерудные минералы.

Особенностью медно-цинковой руды является тонкая взаимная вкрапленность сульфидных минералов, доходящая вплоть до эмульсионной.

Медно-цинковая руда на действующей обогатительной фабрике (ОФ) перерабатывается по схеме прямой селективной флотации, включающей: измельчение руды до крупности 70–75 % класса $-0,071$ мм; операцию межстадиальной флотации с выведением части готового медного концентрата; измельчение камерного продукта межстадиальной флотации до крупности 80–85 % класса $-0,071$ мм; операцию флотации медной «головки» с выведением части готового медного концентрата; измельчение камерного продукта операции флотации медной «головки» до крупности 90–92 % класса $-0,071$ мм; основную и контрольную медные флотации; доизмельчение грубого медного концентрата до крупности 95–98 % класса $-0,045$ мм; I–II перечистные медные флотации с получением готового медного концентрата; основную и контрольные цинковые флотации;

доизмельчение грубого цинкового концентрата до крупности 95–98 % класса –0,045 мм; I–III перечистные цинковые флотации с получением готового цинкового концентрата.

В ходе технологического сопровождения работы ОФ и анализа результатов генерального опробования фабричной технологии обогащения медно-цинковой руды специалистами АО «Уралмеханобр» установлен эффект циркуляционной концентрации золота в цикле медной флотации («основная медная флотация–доизмельчение грубого медного концентрата–I перечистная флотация»). Показано, что массовая доля золота в разгрузке мельницы доизмельчения грубого медного концентрата, работающей в замкнутом цикле с гидроциклоном, в 2,5–3,3 раза выше его массовой доли в исходной руде. При этом в циклах рудного измельчения, для которых характерен этот эффект [6, 8–10], циркуляционной концентрации золота не наблюдается.

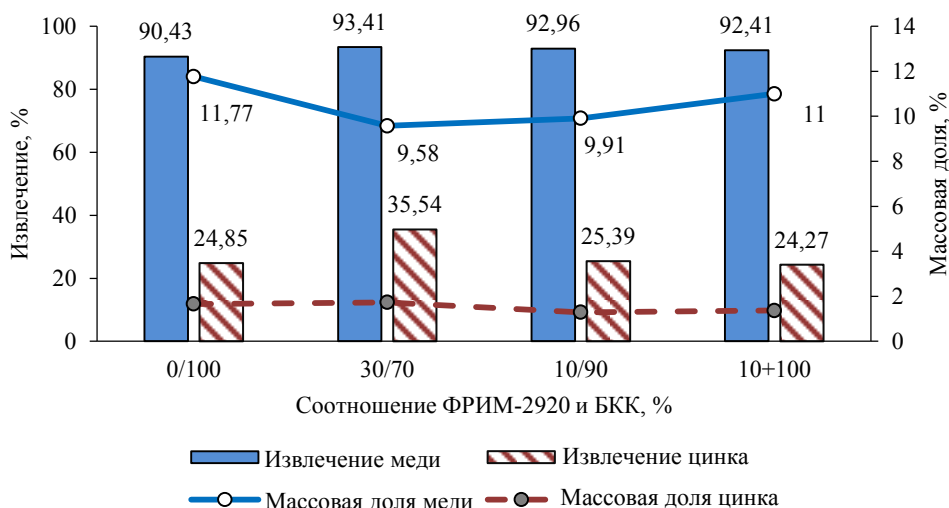


Рисунок 2. Зависимость извлечения и массовой доли меди и цинка в пенном продукте основной медной флотации от соотношения ФРИМ-2920 и БКК

Figure 2. Dependence of the recovery and mass fraction of copper and zinc in the froth product of the main copper flotation on the ratio of FRIM-2920 and butyl xanthate

Результатами исследований по гравитационному выделению золота из разгрузки мельницы доизмельчения грубого медного концентрата посредством центробежной концентрации в центробежном концентраторе и последующей перечистки его тяжелой фракции на концентрационном столе показана принципиальная возможность получения гравитационного продукта с массовой долей золота до 200 г/т при его операционном извлечении до 29 %.

Сравнительные испытания традиционной флотационной и комплексной флотационно-гравитационной технологий показали, что внедрение центробежной концентрации в цикл медной флотации позволит получать гравитационный концентрат с массовой долей золота 50 г/т при извлечении 3,3 % (от руды). При этом суммарное извлечение золота в гравитационный и медный концентраты по комплексной технологии увеличится более чем на 1,5 %. Несмотря на, казалось бы, незначительный прирост извлечения золота в товарную продукцию, комплексная технология является экономически эффективной со сроком окупаемости капитальных затрат не более 2,5 лет.

Другим эффективным направлением в повышении технологических показателей обогащения медно-цинковых руд является совершенствование номенклатуры применяемых реагентов, сочетание сильных и слабых реагентов-собирателей [11–18]. Тестовые исследования собирательных свойств, проведенные в АО «Уралмеханобр», показали, что из множества реагентов как отечественного, так и импортного производства, представленных на российском рынке, интересные результаты при обогащении медно-цинковых руд колчеданного месторождения получены с применением реагента-коллектора ФРИМ-2920. Реагент ФРИМ-2920 относится к классу диалкилдитиофосфатов (аэрофлотов), использование которых самостоятельно или в сочетании с другими собирателями позволяет увеличить извлечение цветных и благородных металлов и в определенной мере повысить селективность процессов разделения сульфидных минералов.

На основании результатов флотационных опытов (рис. 2) отмечено, что дополнительная подача в процесс основной медной флотации ФРИМ-2920 в количестве 10 % к общему расходу бутилового ксантогената калия (БКК) способствует увеличению выхода пенного продукта на 1,5 % относительно выхода пенного продукта базового реагентного режима, предусматривающего только подачу БКК, без существенного снижения качества пенного продукта. При этом отмечается прирост извлечения меди в пенный продукт на 2,0 %. Увеличение доли ФРИМ-2920 в смеси с БКК существенно повышает выход пенного продукта (до 21,1 %) и извлечение меди в пенный продукт (до 93,4 %). Однако при этом отмечается снижение массовой доли меди в пенном продукте (до 9,6 %) и увеличение потерь цинка в нем (до 35,5 %).

Результаты контрольных замкнутых опытов, выполненных по принципу непрерывного технологического процесса, показали, что по технологии с применением сочетания БКК и ФРИМ-2920 и корректировкой технологического режима флотации извлечение основных ценных металлов в товарную продукцию относительно аналогичных показателей для традиционного фабричного реагентного (с применением только БКК) и технологического режима увеличивается: меди – на 0,87 %, цинка – на 0,4 %, золота – на 3,22 %.

Одним из эффективных способов селективной флотации медно-цинковых руд, основанных на повышении скорости флотации сфалерита и усилении депрессии пирита, является тепловое кондиционирование пульпы перед операцией цинковой флотации [19–21].

В АО «Уралмеханобр» проведены сравнительные исследования флотации руды в цинковом цикле при изменении температуры пульпы как по фабричной, так и по усовершенствованной схеме флотации.

Фабричная схема цинкового цикла предусматривает проведение основной, контрольной и трех перечистных операций флотации с возвратом пенного продукта контрольной цинковой флотации и камерного продукта первой перечистой цинковой флотации в основную цинковую флотацию. Усовершенствованная схема флотации подразумевает проведение I и II основных, контрольной и трех перечистных операций флотации с возвратом пенного продукта контрольной цинковой флотации и камерного продукта первой перечистой цинковой флотации во II основную цинковую флотацию. Фабричная технология осуществляется при температуре пульпы не более 30–35 °С. При усовершенствованной технологии процесс цинковой флотации рекомендуется вести при температуре пульпы 40–45 °С. По результатам исследований (рис. 3) установлено, что повышение температуры пульпы в цикле цинковой флотации на 10 °С и изменение

точки возврата промпродуктов цинкового концентрата увеличивают качество с 48,5 до 51,1 % при одновременном увеличении извлечения цинка в цинковый концентрат с 62,6 до 65,6 %.

Выводы. При обогащении медно-цинковой руды колчеданного месторождения в условиях действующей обогатительной фабрики установлен эффект циркуляционной концентрации золота в цикле доизмельчения грубого медного концентрата.

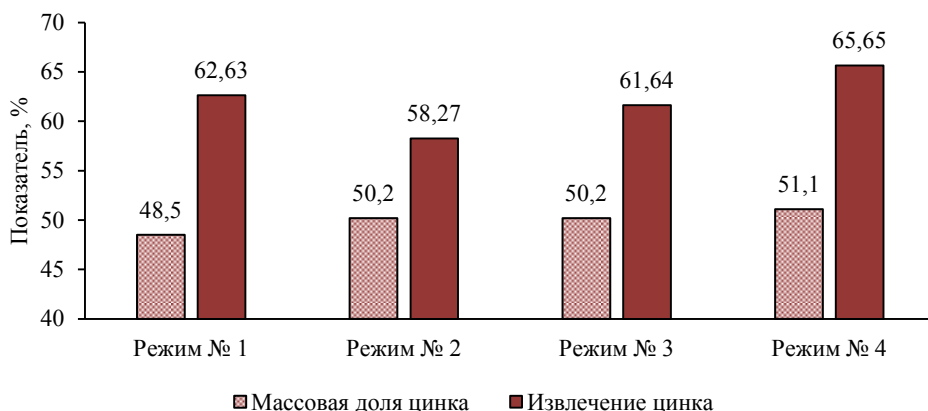


Рисунок 3. Показатели обогащения руды в цинковом цикле флотации при вариации температуры пульпы и изменении схемы флотации: режим № 1 – температура пульпы 30–35 °С, фабричная схема цинкового цикла; режим № 2 – температура пульпы 40–45 °С, фабричная схема цинкового цикла; режим № 3 – температура пульпы 30–35 °С, схема с изменением точки возврата промпродуктов цикла цинковой флотации; режим № 4 – температура пульпы 40–45 °С, схема с изменением точки возврата промпродуктов цикла цинковой флотации

Figure 3. Indicators of ore beneficiation in the zinc flotation cycle under pulp temperature variation and changed flotation scheme: mode № 1 – 30–35 °С pulp temperature and the factory scheme of zinc cycle; mode № 2 – 40–45 °С pulp temperature, and the factory scheme of zinc cycle; mode № 3 – 30–35 °С pulp temperature and a scheme with a changed return point of zinc flotation cycle middlings; mode № 4 – 40–45 °С pulp temperature and a scheme with a changed return point of zinc flotation cycle middlings

Результатами исследований по центробежной концентрации золота в центробежном концентраторе с последующей перераспределением его тяжелой фракции на концентрационном столе показана возможность получения гравитационного продукта с массовой долей золота до 200 г/т при его операционном извлечении до 29 %.

Отмечено, что комплексная флотационно-гравитационная технология обогащения медно-цинковой руды позволит увеличить сквозное извлечение золота в товарную продукцию более чем на 1,5 %.

Применение в технологии флотации медно-цинковой колчеданной руды сочетания сульфгидрильного собирателя (бутилового ксантогената калия) и диалкилдитиофосфата ФРИМ-2920 способствует увеличению извлечения меди и золота в медный концентрат на 0,87 % и 3,22 %, соответственно, и цинка в цинковый концентрат на 0,4 %.

Увеличение температуры пульпы в цикле цинковой флотации до 40–45 °С с возвратом пенного продукта контрольной цинковой флотации и камерного продукта первой перераспределительной цинковой флотации во II основную цинковую флотацию позволяет увеличить массовую долю цинка в цинковом концентрате с 48,5 до 51,1 % при одновременном увеличении извлечения цинка в цинковый концентрат с 62,6 до 65,6 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология обогащения медных и медно-цинковых руд Урала / под ред. В. А. Чантурия и И. В. Шадруновой. М.: Наука, 2016. 387 с.
2. Чинова М. И., Дресвянкина Т. П., Мамонов С. В. Совершенствование технологий обогащения полиметаллических руд // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения – 2019): матер. Междунар. совещания. 2019. С. 214–217.
3. Мамонов С. В., Дресвянкина Т. П., Зияйтинов С. В., Ершов А. А. Получение медных и цинковых концентратов из медных руд // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. XXV Междунар. науч.-техн. конф. в рамках XVIII Уральской горнопромышленной декады 2–11 апреля 2020 г. Екатеринбург, 2020. С. 333–338.
4. Бочаров В. А., Манцевич М. И., Видуецкий М. Г., Скопов Е. В., Захаров Б. А. Технологии глубокой и комплексной переработки руд цветных металлов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья / под ред. В. А. Чантурия. М.: Руда и металлы, 2008. 283 с.
5. Белогуб Е. В., Масленников В. В., Цигалов А. М. Поведение золота при обогащении руд октябрьского медно-цинково-колчеданного месторождения (Башкортостан) // Колчеданные месторождения – геология, поиски, добыча и переработка руд: матер. Всерос. науч. конф. (V Чтения памяти С. Н. Иванова). Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2013. С. 8–11. URL: http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/v_chteniya_pamyati_sn_ivanova.pdf
6. Морозов Ю. П. Повышение комплексности использования сульфидных руд на основе дополнительного извлечения золота. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2015. 61 с.
7. Чантурия Е. Л. Развитие теории и методов модификации технологических свойств минералов в разделительных процессах обогащения труднообогатимых руд цветных и редких металлов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2006. 338 с.
8. Способ обогащения золотосодержащих продуктов: пат. 2598668 Рос. Федерация. № 2015126385/03; заявл. 01.07.2015; опубл. 27.09.2016. Бюл. № 27. 7 с.
9. Морозов Ю. П., Хамидулин И. Х., Фалей Е. А., Черкасов В. Ю. Накопительные технологии гравитационного извлечения золота при обогащении сульфидных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2013. № 7. С. 102–106.
10. Afanasenko S. I., Lazaridi A. N., Safonov S. A. Experimental studies of centrifugal concentrators with fluidization and horizontal and vertical of rotor spinning // IMPC 2018, Moscow, 17–21 September 2018. Paper 826. P. 924–930.
11. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Kayumov A. A. Rational separation of complex copper-zinc concentration of sulfide ore // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. No. 4. P. 793–801.
12. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., D'yachkov F. G. Enhancing the disparity in flotation properties of nonferrous metal sulfides using sulfhydryl collecting agents with different molecular structures // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. No. 2. P. 389–397.
13. Ignatkina V. A., D'yachkov F. G., Bocharov V. A. Collecting properties of diisobutyl ditiophosphinate in sulfide minerals flotation from sulfide ore // Journal of Mining Science. 2013. Vol. 49. No. 5. P. 795–802.
14. Игнаткина В. А. Развитие теории селективности действия сочетаний собирателей при флотации труднообогатимых руд цветных металлов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2011. 523 с.
15. Bradshaw D. J., Harris P. J., O'Connor C. T. Synergistic interactions between reagents in sulfide flotation // The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 1998. July/August. P. 189–194.
16. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Chanturia E. L. Comprehensive processing of copper-zinc ore flotation tailings // Mining Journal. 2013. No. 12. P. 68–71.
17. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Milovich F. O. Selected composition sulfhydryl collectors and flotation kinetics of sulfide minerals from refractory pyrite pyrrhotite ores of non-ferrous metals // XXVIII IMPC, Quebec, 11–15 September 2016. P. 1–9.
18. Ryaboy V. I., Levkovets S. E., Kretov V. P., Ryaboy I. V. Using effective dialkyl dithiophosphates in the flotation of gold ores // IMPC 2018, Moscow, 17–21 September 2018. Paper 673. P. 1872–1881.
19. Бочаров В. А., Рыскин М. Я. Технология кондиционирования и селективной флотации руд цветных металлов. М.: Недра, 1993. 288 с.
20. Авдохин В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. М.: Горная книга, 2021. Том 1. Обоганительные процессы. 424 с.
21. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. М.: Горная книга, 2019. 280 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2023 года

Сведения об авторах:

Мамонов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, заведующий отделом обогащения (наука) АО «Уралмеханобр», заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых Технического университета УГМК. E-mail: mamonov_sv@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8347-5252>

Волкова Светлана Владимировна – старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7545-0125>

Чинова Надежда Борисовна – старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9329-1079>

Хисамова Александра Станиславовна – инженер лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0420-8234>
Горайчук Павел Константинович – инженер лаборатории обогащения руд цветных металлов и техногенного сырья АО «Уралмеханобр». E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-6247-8928>

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-86-96

Improving the technology of copper-zinc ore beneficiation of a Uralian-type pyrite deposit

Sergei V. Mamonov^{1,2}, Svetlana V. Volkova¹, Nadezhda B. Chinova¹, Aleksandra S. Khisamova¹,
Pavel K. Goraichuk¹

¹ JSC Uralmexhanobr, Ekaterinburg, Russia.

² Technical University of UMMC, Verkhnyaya Pyshma, Russia.

Abstract

Introduction and research objective. Copper-zinc ore of pyrite deposits of the Uralian type are refractory. Difficulties in beneficiation are due to their material composition: fine coarseness and emulsion impregnation of ore minerals in each other; a large amount of flotation-active pyrite, a high content of finely dispersed and submicroscopic gold in sulfides, etc. In the course of pyrite ore processing at dressing mills, 83–91% of copper and 10–45% of gold are extracted into copper concentrates, and 46–78% of zinc and 5–15% of gold are extracted into zinc concentrates. Increasing the process performance of pyrite deposit ore processing is a promising and urgent task. **Methods of research** included copper-zinc pyrite ore material composition study through quantitative chemical analysis, chemical phase analysis for the forms of copper, zinc, gold and silver compounds, and mineralogical analysis. Technological studies were carried out by flotation and gravity methods using a centrifugal concentrator and a concentration table.

Conclusions. In the course of pyrite deposit copper-zinc ore beneficiation at the dressing mill, the effect of circulating concentration of gold in the coarse copper concentrate regrinding cycle was established. The results of studies on the centrifugal concentration of gold in a centrifugal concentrator with further secondary cleaning of its heavy fraction on a concentration table show the possibility of obtaining a gravity product with a mass fraction of gold up to 200 g/t under its operational extraction up to 29%. It was noted that the integrated flotation-gravity technology for copper-zinc ore beneficiation will increase the through extraction of gold into marketable mineral products by more than 1.5%. The use of a combination of butyl potassium xanthate and FRIM-2920 reagent-collector in the copper-zinc pyrite ore flotation technology contributes to increased extraction of copper and gold into copper concentrate by 0.87% and 3.22%, respectively, and zinc into zinc concentrate by 0.4%. Increasing the pulp temperature in the zinc flotation cycle to 40–45 °C and returning the control zinc flotation concentrate and tailings from the first cleaning flotation of zinc to the II main zinc flotation allows increasing the mass fraction of zinc in the zinc concentrate from 48.5 to 51.1% under a simultaneous increase in the extraction of zinc into zinc concentrate from 62.6 to 65.6%.

Keywords: copper; zinc; gold; extraction; copper-zinc ore; pyrite deposit; centrifugal concentration; flotation; FRIM-2920; thermal conditioning.

REFERENCES

1. Chanturiia V. A., Shadrinova I. V. (eds.) *The technology of Uralian copper and copper-zinc ore beneficiation*. Moscow: Nauka Publishing; 2016. (In Russ.)
2. Chinova M. I., Dresviankina T. P., Mamonov S. V. Improving beneficiation technologies of polymetallic ores. In: *Problems and prospects of effective processing of mineral raw materials in the 21st century (Plaksin readings 2019): Proceedings of Internat. meeting*. 2019. P. 214–217. (In Russ.)

3. Mamonov S. V., Dresviankina T. P., Ziatdinov S. V., Ershov A. A. Obtaining copper and zinc concentrates from copper ore. In: *Scientific fundamentals and practice of ore and technogenic raw material processing: Proceedings of 15th Internat. sci. and pract. conf. within the framework of the 18th Ural Mining Decade, 2–11 April 2020*. Ekaterinburg, 2020. P. 333–338.
4. Bocharov V. A., Mantsevich M. I., Viduetskii M. G., Skopov E. V., Zakharov B. A. The technologies of deep and integrated processing of nonferrous metal ore. In: *Advanced technologies of integrated processing of mineral raw materials*. Moscow: Ruda i metally Publishing; 2008. (In Russ.)
5. Belogub E. V., Maslennikov V. V., Tsigalov A. M. The behaviour of gold in the course of ore beneficiation at the Oktiabrsky copper-zinc-pyrite deposit (Bashkortostan). In: *Pyrite deposits. geology, prospecting, extraction, and processing of ore: Proceedings of All-Russian sci. conf. (5th Readings in memory of S. N. Ivanov)*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry UB RAS; 2013. P. 8–11. Available from: http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/v_chneniya_pamyati_sn_ivanova.pdf (In Russ.)
6. Morozov Iu. P. *Improving the integrity of sulphide ore use based on the secondary recovery of gold*. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2015. (In Russ.)
7. Chanturiia E. L. *Developing the theory and methods of modifying the processing properties of minerals in the separation processes of beneficiation of complex ores of nonferrous and rare metals: DSc in Eng. Diss.* Moscow: 2006. (In Russ.)
8. Morozov Iu. P., Khamidulin I. Kh., Falei E. A. *The method of beneficiation for gold-containing products*. Patent RF no. 2598668; 2016. (In Russ.)
9. Morozov Iu. P., Khamidulin I. Kh., Falei E. A., Cherkasov V. Iu. Storage technologies of gravitational extraction of gold when enriching sulphide ores. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2013; 7: 102–106. (In Russ.)
10. Afanashenko S. I., Lazaridi A. N., Safonov S. A. Experimental studies of centrifugal concentrators with fluidization and horizontal and vertical of rotor spinning. *IMPC 2018, Moscow, 17–21 September 2018*. Paper 826. P. 924–930.
11. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Kaiumov A. A. Rational separation of complex copper-zinc concentration of sulfide ore. *Journal of Mining Science*. 2016; 52(4): 793–801.
12. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Diachkov F. G. Enhancing the disparity in flotation properties of nonferrous metal sulfides using sulphydryl collecting agents with different molecular structures. *Journal of Mining Science*. 2015; 51(2): 389–397.
13. Ignatkina V. A., Diachkov F. G., Bocharov V. A. Collecting properties of diisobutyl ditiophosphinate in sulfide minerals flotation from sulfide ore. *Journal of Mining Science*. 2013; 49(5): 795–802.
14. Ignatkina V. A. *Developing the theory of selectivity of collector combination action under non-ferrous metal refractory ore flotation: DSc in Eng. diss.* Moscow; 2011. (In Russ.)
15. Bradshaw D. J., Harris P. J., O'Connor C. T. Synergistic interactions between reagents in sulfide flotation. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 1998. July/August. P. 189–194.
16. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Chanturia E. L. Comprehensive processing of copper-zinc ore flotation tailings. *Mining Journal*. 2013; 12: 68–71.
17. Ignatkina V. A., Bocharov V. A., Milovich F. O. Selected composition sulphydryl collectors and flotation kinetics of sulfide minerals from refractory pyrite pyrrhotite ores of non-ferrous metals. *XXVIII IMPC, Quebec, 11–15 September 2016*. P. 1–9.
18. Ryaboi V. I., Levkovets S. E., Kretov V. P., Ryaboi I. V. Using effective dialkyl dithiophosphates in the flotation of gold ores. *IMPC 2018, Moscow, 17–21 September 2018*. Paper 673. P. 1872–1881.
19. Bocharov V. A., Ryskin M. Ia. *The technology of conditioning and selective flotation of nonferrous metal ore*. Moscow: Nedra Publishing; 1993. (In Russ.)
20. Avdokhin V. M. *The fundamentals of mineral beneficiation. Vol. 1. Beneficiation processes*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2021. (In Russ.)
21. Abramov A. A. *Flotation methods of beneficiation*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2019. (In Russ.)

Received 21 March 2023

Information about the authors:

Sergei V. Mamonov – PhD (Engineering), Head of Processing Department (Science), JSC Uralmexhanobr, Head of the Department of Mineral Processing, Technical University of UMMC. E-mail: mamonov_sv@umbr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8347-5252>

Svetlana V. Volkova – senior researcher, Laboratory of Nonferrous Metal Ore and Technogenic Raw Material Processing, JSC Uralmexhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0008-7545-0125>

Nadezhda B. Chinova – senior researcher, Laboratory of Nonferrous Metal Ore and Technogenic Raw Material Processing, JSC Uralmexhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9329-1079>

Aleksandra S. Khisamova – engineer, Laboratory of Nonferrous Metal Ore and Technogenic Raw Material Processing, JSC Uralsmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0001-0420-8234>

Pavel K. Goraichuk – engineer, Laboratory of Nonferrous Metal Ore and Technogenic Raw Material Processing, JSC Uralsmekhanobr. E-mail: umbr@umbr.ru; <https://orcid.org/0009-0005-6247-8928>

Для цитирования: Мамонов С. В., Волкова С. В., Чинова Н. Б., Хисамова А. С., Горайчук П. К. Совершенствование технологии обогащения медно-цинковой руды колчеданного месторождения Уральского типа // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 86–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-86-96

For citation: Mamonov S. V., Volkova S. V., Chinova N. B., Khisamova A. S., Goraichuk P. K. Improving the technology of copper-zinc ore beneficiation of a Uralian-type pyrite deposit. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 86–96 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-86-96

ОХРАНА ТРУДА

УДК 622.861

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-97-112

Систематизация техногенных рисков индустриального характера на горнодобывающих предприятиях

Аленичев В. М.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

e-mail: alenichev@igduran.ru

Реферат

Целью исследований является выработка общего подхода к систематизации признаков защищенности горнопромышленных территорий, природных и техногенных объектов. **Актуальность работы** обусловлена необходимостью обеспечения безопасности хозяйственной деятельности на территории ведения горных работ.

Методология проведения исследований. Недропользование связано с необходимостью учета множества факторов, приводящих к риску реализации принимаемых решений. Риск рассматривается как потенциальная, численно оцениваемая вероятность реализации неблагоприятных событий (ситуаций), сопровождающих их последствий в виде аварий, человеческих жертв, потерь, ущерба, убытков и т. п. Риск – это количественная оценка опасностей, характеризующих ситуацию, имеющую неопределенность исхода при обязательном проявлении неблагоприятных последствий. Состояние безопасности любого объекта горнодобывающего предприятия целесообразно оценивать рядом показателей – индикаторов, характеризующих устойчивость системы к негативным воздействиям, которые обусловлены инфраструктурными, природными, геологическими, технологическими, экономическими и финансовыми факторами. Ситуация риска, обусловленная статистическими процессами, связана с сопутствующими условиями: наличием неопределенности, необходимостью альтернативного выбора и возможностью вероятностной оценки принимаемых вариантов (альтернатив). Негативные явления при недропользовании проявляются в виде деформирования бортов и отвалов, обрушения отдельного уступа или их группы, разрушения транспортных и энергетических коммуникаций, камнепада, отклонения технологического процесса обогащения от запроектированного, нарушения техногенных объектов и эколого-биологической среды, которые следует трактовать как техногенные катастрофы индустриального характера.

Результаты. Обоснована классификация рисков как многомерной категории по факторам (причинам) возникновения, движущая сила которых порождает негативный процесс и определяет его характеристики или отдельные черты.

Выводы. Систематизация различных рисков на основании инфраструктурных, горно-геологических, технологических и экологических факторов обеспечивает на начальном этапе формирования рисков определение их характеристик и разработку системы управляющих мероприятий для обеспечения устойчивого функционирования горнодобывающего предприятия.

Ключевые слова: риск; мониторинг; инфраструктурные факторы; геологические факторы; технологические факторы; геомеханические факторы; экологические факторы; виды рисков; индикаторы защищенности; техногенные образования.

Работа выполнена по теме 2 (Госзадание № 075-00412-22ПР), Регистрационный № 123012300006-0.

Введение. Сферы человеческой деятельности, связанные с необходимостью учета множества влияющих условий и факторов, приводят к риску реализации принимаемых решений. Объективная природа риска обусловлена вероятностной

сущностью и многовариантностью природных, техногенных, технологических и других процессов, экологических и экономических отношений [1, 2].

В теории и практике понятие «риск» имеет многостороннюю и многозначную направленность. Востребованность в слове риск возникла в результате осознания людьми ответственности за принимаемые решения. Однозначного понимания сущности риска не существует, но несмотря на это он рассматривается как объективная категория, позволяющая оценить возможность трансформации потенциальной опасности в действительности. Поэтому риск рассматривается как потенциальная, численно оцениваемая вероятность реализации неблагоприятных событий (ситуаций), сопровождающих их последствий в виде аварий, человеческих жертв, потерь, ущерба, убытков и т. п. [3, 4].

В настоящее время существует множество вариантов классификаций рисков как многомерной категории по факторам (причинам) возникновения, возможности предвидения, длительности воздействия, сферам проявления и т. п. [5, 6]:

- риск как вероятность убытка; риск как величина возможного убытка;
- риск как функция, являющаяся в основном результатом вероятности и величины убытка;
- риск как эквивалент вариации распределения вероятностей всех возможных последствий рискованного хода дела;
- риск как полувариация распределения всех исходов, взятая лишь для негативных последствий и по отношению к некоторой установленной базовой величине;
- риск как взвешенная линейная комбинация вариации и ожидаемой величины.

Методология проведения исследований. Следует отметить, что в узком смысле риск характеризуется как количественная оценка опасностей. Другими словами, риск – количественная оценка опасностей, характеризующих ситуацию, имеющую неопределенность исхода при обязательном проявлении неблагоприятных последствий. Ситуация риска, обусловленная статистическими процессами, связана с сопутствующими условиями [7, 8]:

- наличием неопределенности;
- необходимостью альтернативного выбора (отказ от выбора также разновидность выбора);
- возможностью вероятностной оценки принимаемых вариантов (альтернатив).

При этом наблюдается тесная связь между риском, вероятностью и неопределенностью. Причиной возникновения рисков является неопределенность, которая имеет место во всех сферах деятельности и состояниях природных и технологических объектов недропользования. Риск отражает состояние ситуации, характеризующейся неопределенностью исхода и обязательным наличием неблагоприятных факторов, способных породить негативные события.

Возникновение риска вызывается фактором (причиной), движущая сила которого (-ой) порождает негативный процесс и определяет его характеристики или отдельные черты. Объективная природа технических рисков обусловлена вероятностной сущностью природных, техногенных, технологических и производственных процессов, характеризующихся нечеткостью и размытостью описания объектов. Наличие факторов, влияние которых не является детерминированным, приводит к неопределенности результатов. Неполная и неточная информация, используемая на стадии принятия решений, порождает события, риск зарождения и развития которых зависит от конкретной ситуации, характеризующейся неопределенностью исхода в виде обязательной реализации негативных или позитивных событий. Негативное событие характеризуется ситуацией, являющейся результатом нарушения первоначального состояния системы, объекта, процесса и субстанции.

Создавшаяся ситуация ограничивает и/или исключает дальнейшую безопасную деятельность для выполнения поставленных целей, планов, задач и других обязательств.

Способность природного и техногенного объекта, ситуации и процесса к самосохранению при внутренних и внешних воздействиях определяется защищенностью, характеризующей безопасностью их состояния. Безопасность сложной системы обеспечивается условиями, при которых действие внешних и внутренних факторов не приводит к риску возникновения (появления) негативных ситуаций и событий в соответствии с имеющимися на данном этапе потребностями, знаниями и представлениями. Риск отражает состояние ситуации, имеющей неопределенность исхода и характеризующейся обязательным наличием неблагоприятных факторов, способных породить негативные события. В общем случае под риском при недропользовании понимается появление неблагоприятного события, которое оценивается вероятностью его реализации и последствиями в виде нарушения состояния и устойчивости техногенных и природных объектов.

Методологические принципы исследований, направленных на поиск решений для обеспечения безопасности, базируются на системности подхода, мониторинге и анализе аргументов (совокупности геоданных), необходимых для оценки вероятности проявления конкретного вида риска [9, 10].

Риски на горнодобывающем предприятии в общем случае обычно проявляются в виде негативных событий, которые приводят к потенциальной угрозе его функционирования (*Методические указания по оценке рисков развития деформаций, мониторингу и управлению устойчивостью бортов и уступов, карьеров, разрезов и откосов отвалов. М.: ИПКОН РАН, 2022. 90 с.*). Риски в горнодобывающей отрасли подразделяют обычно на риски основной, вспомогательной и обеспечивающей деятельности. Риски основной производственной деятельности обычно классифицируются как технологические, технические и техногенные (аварийные). Первые обусловлены нарушением технологических процессов при добыче, транспортировании и обогащении, размещении пустых пород и некондиционного сырья в отвалах. Причиной технических рисков являются ошибки, допущенные при проектировании горнопромышленного комплекса, недостатки технологии, неправильный выбор основного горнотранспортного оборудования и отсутствие высококвалифицированных кадров для его эксплуатации и ремонта.

Существует общепринятое мнение, что техногенная катастрофа является следствием умышленных или неумышленных действий человека [11, 12]. Негативные явления при недропользовании в виде деформаций и обрушения горных пород в выработках; сползания, осыпи, обрушения и оплывины откосов; провалы земной поверхности и обрушения кровли; стрельяния, толчки, микроудары, горные удары, локальные землетрясения; прорыв дамб накопителей отходов производства (шламо- и хвостохранилищ) и гидроотвалов; сейсмическое воздействие взрывов на здания и сооружения; взрывы газов и пыли, эндогенные и экзогенные пожары; прорывы воды с водоносных горизонтов и затопления; нарушение земель на стадии разработки месторождений; загрязнение почвы, поверхностных, грунтовых и подземных вод следует трактовать как техногенные катастрофы индустриального характера. Эти риски в горном деле как отрасли техногенной деятельности характеризуются разными факторами (причинами), основными из которых являются изменения геомеханических и гидрогеологических свойств вмещающих пород и горного массива в процессе отработки месторождения, нарушения технологии, отклонения фактических параметров элементов системы разработки от проектных, геодинамические подвижки, определяющие первичное и вторичное

напряженно-деформированное состояние (НДС) [12–14], (*О безопасности: Федеральный Закон № 390-ФЗ: [принят Гос. Думой РФ 07.12.2010 г.: одобрен Советом Федерации 15.12.2010 г.]*).

В общем случае основные приемы управления техногенными рисками сводятся к следующим операциям:

- определение причин (факторов) риска;
- выявление аргументов (параметров), определяющих зарождение и развитие негативного события или явления;
- обоснование индикаторов, определяющих стабильное состояние объекта (явления);
- снижение уровня опасности путем реализации комплекса инженерных и организационно-технических мероприятий, обеспечивающих постоянное и стабильное состояние объекта (явления) и сохранение соответствия технологических процессов нормативным;
- сохранение допустимых характеристик (последствий) риска за счет использования средств защиты.

Профилактические меры по снижению вероятности зарождения и развития природных и антропогенных рисков при недропользовании сводятся в основном к мониторингу состояния природных и техногенных объектов, непрерывному наблюдению за изменением физико-механических, технологических и гидравлических (влагоемкость, водоотдача, водоустойчивость, капиллярность, набухание, усадка, просадочность, смачиваемость, абсорбция, адсорбция, липкость) свойств горных пород, за первичным и вторичным напряженно-деформированным состоянием горного массива (*Методические указания по оценке рисков ...; О безопасности: Федеральный Закон № 390-ФЗ...*), [15].

При использовании физико-технических геотехнологий возникновение техногенных рисков обусловлено недостаточной достоверностью и полнотой имеющихся геоданных, несоответствием технологических параметров системы разработки и ее элементов горнотехническим условиям и нарушением нормативных регламентов. Возникающие при недропользовании неблагоприятные ситуации и последствия можно трактовать как потенциальные события, отрицательно влияющие на функционирование предприятия и достижение поставленной цели. Снижение неопределенности при выборе неизбежного решения способствует повышению количественной и качественной оценки вероятности достижения планируемого результата.

Природа зарождения рисков определяется проектом разработки месторождения, анализом состояния природных и техногенных объектов, реализацией технологических процессов добычи и переработки минерального сырья, принятием недостаточно обоснованных организационно-технических мероприятий по эффективному и безопасному развитию горно-технологического комплекса, оценкой возможности достижения предполагаемого результата, неудачами и отклонениями от цели. Несмотря на неопределенность и недостаточную достоверность геоданных, используемых при проектировании горного предприятия и в процессе разработки месторождения, предоставляется возможность оценить реализацию негативных процессов с использованием статистических числовых характеристик случайных аргументов, описывающих исходное состояние исследуемого объекта или явления.

В общем случае чрезвычайные ситуации техногенного характера на производствах происходят по следующим причинам: нарушение техники безопасности и трудовой дисциплины, низкая квалификация сотрудников, отсутствие ответствен-

ного руководства, нарушение технологических регламентов и правил технического обслуживания, износ оборудования, недостаточное геоинформационное описание состояния природных и техногенных объектов, недочеты или брак при строительстве.

В процессе разработки месторождения горнодобывающее предприятие выступает с точки зрения его функционирования как объект риска, что отражается на его производственно-хозяйственной деятельности из-за влияния инфраструктурных, природных, геологических, технологических, экономических, финансовых и других факторов [6, 9]. Причина зарождения и развития неблагоприятных процессов на горнотехнических объектах обусловлена неопределенностью геологических данных, прочностных свойств пород и горного массива, а также моделей (аналитических зависимостей), используемых для расчета параметров и показателей, обеспечивающих сохранность природных и техногенных образований [16]. Следовательно, риск при недропользовании как потенциальная, численно оцениваемая вероятность реализации неблагоприятных событий (ситуаций), сопровождающих их последствий в виде аварий, человеческих жертв, потерь, ущерба, убытков и т. п., зависит от неопределенности горно-геологических данных (ошибки обнаружения, расположения и соотношения рангов блочных структур и различных разновидностей пород, погрешности определения границ основных разломов и литологических разновидностей) и геомеханических параметров пород и горного массива (модуль деформации, угол внутреннего трения, сцепление, поровое давление и другие свойства), а также погрешности модели, заключающейся в непредсказуемости получения достоверных результатов, вероятность которых не гарантирована даже при использовании в расчетах точных значений аргументов (параметров и показателей).

Использование неопределенной и недостоверной геоинформации на различных «жизненных» этапах горнодобывающего предприятия (проектирование, строительство, эксплуатация и ликвидация) приводит в период разработки месторождения к техногенным катастрофам индустриального характера, подразделяемым на три вида неблагоприятных ситуаций: техногенные катастрофы, техногенные аварии и техногенные инциденты.

Принимая во внимание, что основным источником наполнения бюджета Российской Федерации является недропользование, ориентированное на реализацию научно-обоснованных технологических и производственно-технических решений и организационных мероприятий, обеспечение комплексного и полного использования минерального сырья является актуальной задачей [9, 12]. Поэтому развитие научно-методических основ устойчивого функционирования и защищенности горнотехнических систем как состояние безопасности всех объектов горнодобывающего предприятия целесообразно оценивать комплексом количественных характеристик и взаимосвязанных показателей – индикаторов, характеризующих стабильность системы к негативным процессам за счет выявления величины допустимых отклоняющих воздействий, а также уровня риска или ущерба, причиненного вреда.

Одной из актуальных проблем обеспечения устойчивого развития горнотехнических систем как в долгосрочном, так и в краткосрочном плане является управление природно-техногенным риском [1–3, 13–15], под которым понимают его заблаговременное предвидение, выявление определяющих факторов, реализацию мероприятий по его снижению за счет их целенаправленного изменения. Несвоевременное выявление рисков геодинамического происхождения, причиной которых является геологическая среда, приводит к негативным ситуациям в виде

опасности инженерно-технического, социально-экономического, экологического и другого характера. Успешное решение данной достаточно сложной задачи возможно только на основе научно-методических рекомендаций, включающих анализ основных факторов, определяющих устойчивое и безопасное функционирование горнодобывающего комплекса, методы и математические модели, позволяющие проведение расчета необходимых количественных и прогнозных оценок.

Возникновение и развитие техногенных катастроф обусловлено совместным действием объективных и субъективных факторов, создающих условия для реализации негативного события.

Непосредственными причинами техногенных катастроф могут быть:

- просчеты при проектировании, связанные с человеческой неопределенностью, обусловленной невозможностью точного предсказания в процессе работы поведения людей, отличающихся друг от друга уровнем образования, опытом, творческими способностями и интересами;

- геоинформационная и техническая неопределенность; геоинформационная неопределенность связана с горно-геологическими данными, свойствами горного массива и пород, неадекватностью используемых моделей расчета (аналитических закономерностей) для определения основных параметров и показателей техногенных объектов; техническая неопределенность обусловлена сложностью технологии, непредсказуемостью производственных процессов и надежности оборудования, объемом производства, уровнем автоматизации, темпами обновления и т. д.;

- недостаточная продуманность (обоснованность) размещения производства при анализе инфраструктуры;

- некачественное строительство и/или отступление от проекта;

- человеческий фактор, выражающийся в нарушении требований технологических процессов из-за недостаточной подготовки или недисциплинированности и халатности персонала, его невнимательности и нарушения правил эксплуатации техники, транспорта, приборов и оборудования.

На основании изложенного можно сделать вывод, что в основе техногенного риска индустриального характера на горнодобывающем предприятии лежат неопределенность и недостоверность геоданных, неопределенность ситуации при ее осуществлении, вероятностная природа человеческой деятельности и др.

Объективная природа техногенных рисков в горнодобывающей отрасли обусловлена вероятностной сущностью природных и технологических процессов, многовариантностью отношений, которые проявляются в результате антропогенных факторов воздействия на технологию и производственные процессы при добыче минерального сырья. Объективность риска обусловлена тем, что он сопровождает все реально происходящие явления, процессы и стороны деятельности. В общем случае под риском понимается совокупность опасностей с вероятностью наступления неблагоприятного события, т. е. риск представляет собой ситуацию оценки вероятности ухудшения состояния (положения). Основным моментом для понимания риска является выяснение роли понятия вероятность и неопределенность, поскольку в узком смысле риск – это количественная оценка опасностей, вызываемых фактором – причиной, являющейся движущей силой любого процесса, определяющей его характер или отдельные черты.

При разработке месторождений оценку и корректировку неопределенностей горно-геологических условий, структуры породного массива и его параметров, физико-механических свойств пород и гидрогеологических условий в пределах каждого исследуемого участка целесообразно проводить с использованием методов

анализа относительной частоты и распределения вероятностей, скорректированных при необходимости субъективными оценками на основе имеющихся данных [16]. Однако выполнение такой оценки и принятия за нее ответственности отдельными лицами является достаточно нетривиальной деятельностью, связанной с ее объективностью и оправданностью. Поэтому при обосновании сложных решений по стабильности геотехногенных объектов при разработке месторождений открытым способом необходимы более строгие методы количественной оценки степени достоверности рекомендуемых конечных результатов.

С учетом указанных положений выбор комплекса индикаторов по данным картографического, геодезического, фотограмметрического и дистанционного зондирования для оценки защищенности, характеризуемой в том числе ненарушенностью горнопромышленных территорий, природных и техногенных объектов и прогноза развития негативных процессов при недропользовании, является актуальной задачей. Возникающие при этом задачи, обусловленные изменением окружающей среды и горно-геологических условий, принятым геотехнологическим укладом, потребностями рынка и другими причинами, анализируются и рассматриваются с позиций минимизации рисков их появления на стадиях принятия предпроектных решений, строительства, эксплуатации и ликвидации предприятия [8, 13, 17], (*О безопасности: Федеральный Закон № 390-ФЗ...*).

Систематизация различных рисков, выявленных на основании установленных признаков и критериев, позволяет объединить их в более общие понятия, учитывающие факторы, порождающие негативные явления, виды деятельности, стадии проектирования и тип объектов, что позволит на начальном этапе формирования рисков выявить источники их появления и разработать систему мероприятий по их управлению и устранению [8, 18], (*Методические указания по определению параметров бортов и уступов карьеров, резов и откосов отвалов. М.: ИПКОН РАН, 2022. 80 с.*). При этом методы оценки техногенных рисков на горнодобывающих предприятиях зависят от существа реализуемого проекта и принятых проектных решений, влияние которых распространяется на сценарии зарождения и эскалации негативных проявлений. Перечень возможных (убедительных) событий определяется путем моделирования с использованием аналитических, вероятностно-статистических и других методов. Наиболее эффективный способ диверсификации рисков на антропогенных объектах горного производства – исключение или снижение их негативных последствий. Недропользование на горнопромышленных территориях всегда сопровождается деформацией земной поверхности, нарушением гидрологических и гидродинамических условий, естественных природных процессов и загрязнением природной среды. В регионе изменяются атмосферные и почвенные условия, образуются депрессионные воронки, наблюдаются другие негативные явления.

Объектом наблюдения и оценки с позиций геоинформационного мониторинга в первую очередь следует рассматривать инженерную инфраструктуру территории, где планируется функционирование добывающего предприятия, а также горный массив, в границах которого находится месторождение полезных ископаемых [8], (*Методические указания по оценке рисков...*). Принятый способ разработки и сущность внутренней структуры геотехнологии предопределяют вероятность появления сопутствующих негативных последствий. Надежность выбранных технологических и технических решений достигается при соблюдении безопасных условий разработки и экологически допустимых изменений состояния природной среды. Поэтому целесообразно выделение комплекса взаимосвязанных и взаимосвязан-

ных факторов, определяющих процессы взаимодействия природной среды и техносферы горнодобывающего предприятия.

Факторы, вызывающие негативные события при недропользовании: инфраструктурные, природные, геологические, технологические, экологические, экономические, финансовые. Структурная схема систематизации техногенных рисков на горнопромышленных территориях, природных и техногенных объектах и в технологических процессах добычи и обогащения представлена в табл. 1.

Инфраструктурные факторы. В настоящее время из-за различных подходов и классификаций разнообразных активов (объектов), расположенных на территории горнодобывающего предприятия, строгого определения термина «инфраструктура» не существует [18, 19]. В общем случае инфраструктура характеризуется комплексом природных и техногенных объектов, социально- и информационно ориентированных систем, находящихся на рассматриваемой территории и предназначенных для длительного использования. Базовая инфраструктура горного предприятия оценивается с точки зрения наличия энергоснабжающих сетей, железных и автомобильных дорог, дамб, плотин, водоемов, телекоммуникационные линии и других объектов жизнеобеспечения. Для обеспечения устойчивого развития горнодобывающего предприятия необходим непрерывный контроль и анализ взаимосвязей существующей инфраструктуры и фактического состояния структуры предприятия с точки зрения сохранности природных ресурсов, складирования отходов перерабатывающего производства и обеспечения эколого-биологической и других видов безопасности.

Риски инфраструктурного фактора связаны с изъятием земель, размещением отдельных экологически опасных техногенных объектов, отсутствием необходимых ресурсов (водных, энергетических), необходимостью привлечения и размещения трудовых ресурсов.

Природные факторы. Природные факторы, характеризующие свойства неживой природы, включают метеорологические, погодные, климатические, геологические, гидрологические, геоморфологические и другие условия. Некоторые из них прямо или косвенно влияют на фауну и флору непосредственно через изменение температуры, давления, влажности воздуха, солености воды, содержания кислорода в воздухе, структуры почвы, содержания флюидов. Другие: гидрологические (обводненность территории, колебания уровня воды, ледовый режим) и геоморфологические (напряженно-деформированное состояние горного массива, современная геодинамика) – могут оказывать существенное влияние на выбор внутренней структуры геотехнологии.

Горно-геологические условия, классифицируемые как статические и динамические геоданные [9], также играют существенную роль при разработке месторождения полезного ископаемого. К статическим геоданным относятся глубина залегания, форма залегания (пластообразная, линзообразная, жилы, штокообразная, рудные гнезда, трубки), число рудных тел (залелей), параметры залегания, мощность, угол падения и простирание пласта (рудного тела), свойства горного массива и породы и полезного ископаемого, в том числе строение залежи, морфология и рудоносность, характер контактов, физико-механические и другие свойства, предопределяющие способ разработки месторождения. Динамические геоданные, учитывающие первичное напряженно-деформированное состояние массива, геотехногенные и геомеханические подвижки, вторичное НДС в техногенной зоне, количество балансовых запасов, текущие промышленные запасы, потери, разубоживание, эксплуатационные запасы, содержание полезного компонента, текстурно-структурные характеристики рудного массива (крупность,

форма зерен, распределение по площади и глубине), влияют на выбор внутренней структуры прогнозируемой геотехнологии [9]. В формировании крупномасштабных деформаций в масштабе бортов карьера играет роль совокупность следующих факторов: структуры различных рангов, прочностные свойства пород, обводненность борта и поровое давление в породном массиве.

Технологические факторы. Производственная структура горнодобывающего комплекса включает техногенные образования в виде карьера (разреза), отвалы пустых пород и забалансовых руд, дамбы, приконтурный массив, объекты перегрузки, размещения и накопления отходов (гидроотвалы, хвостохранилища и т. п.). Состав и взаиморасположение основных объектов горного производства определяются применяемой технологией разработки месторождения, включающей комплекс приемов, методов и процессов: осушение горного массива и подготовка его к выемке и транспортированию, предобогащение и сортировка, формирование и поддержание выработанного пространства.

Комплекс *вспомогательные технологические операции* необходим для систематического выполнения работ по обеспечению безопасности основных технологических процессов.

Экологические факторы, обусловленные интенсивным развитием недропользования, приводят к загрязнению природной среды, нарушению естественных процессов, сокращению запасов природных ресурсов и другим нежелательным явлениям, что сопровождается негативными последствиями для экологического состояния окружающей среды. При этом наряду с абиотическими и биотическими проявляются антропогенные факторы, зависящие от деятельности человека и приводящие к загрязнению среды обитания. Формирование техногенных объектов из отходов промышленного производства сопровождается накоплением тяжелых металлов в почве и водоемах в результате растворения и выщелачивания токсичных горных пород и минералов с последующим переносом вредных примесей фильтрационными потоками. Откачка карьерных и шахтных вод приводит к образованию депрессионных воронок, изменению гидрогеологических и атмосферных условий, обезвоживанию и засолению почвенного слоя на территориях, прилегающих к зонам горных разработок.

Источниками **финансового и экономического рисков** являются инфляция, изменение процентных ставок и обменных курсов, рыночная конкуренция, колебания цен на минеральное сырье и его спрос.

Особое внимание в настоящее время обращается на риски, связанные с обеспечением безопасности производства и труда. Возможность приватизации, национализации, изменения в национальном законодательстве и местных нормативных актах (например, налог на прибыль, положения по охране окружающей среды) приводят к возникновению **политического риска**.

Безусловно, можно выделить **специфические риски**, возникающие в горнодобывающей промышленности, которые могут повлиять на процесс подготовки и эксплуатации месторождений, выбор основных и вспомогательных процессов.

Выводы. Риск при недропользовании как потенциальная, численно оцениваемая вероятность реализации неблагоприятных событий (ситуаций), сопровождающих их последствий в виде аварий, человеческих жертв, потерь, ущерба, убытков и т. п. зависит от неопределенности горно-геологических данных (ошибки обнаружения, расположения и соотношения рангов блочных структур и различных разновидностей пород, погрешности определения границ основных разломов и литологических разновидностей) и геомеханических параметров пород и горного массива (модуль деформации, угол внутреннего трения, сцепление, поровое давление и другие свойства), а также погрешности модели, заключающейся

Таблица 1. Систематизация признаков защищенности горнопромышленных территорий, природных и техногенных объектов
 Table 1. Systematization of the signs of mining territories, natural and man-made features safety

Факторы риска	Объекты рисков	Виды рисков	Способ снижения риска	Индикаторы защищенности		Способы оценки
				вербальный	количественный	
Инфраструктурные	Водоемы, плотины, дамбы; подземные воды; энергетические и транспортные коммуникации; техногенные и социальные объекты; лесные, сельскохозяйственные и другие уголья	Изъятие земель; нарушение элементов инфраструктуры; нарушение целостности земной поверхности; отсутствие необходимых георесурсов; воздействие на лесные, охотничьи и рыбные ресурсы; размещение и привлечение производственного персонала	Выбор: рационального способа разработки и структуры комплекса; эффективных технологий добычи и переработки сырья; места складирования и хранения отходов	Сохранность и возможность развития инфраструктуры; реализация природоохранных мероприятий. Визуальный мониторинг	Наличие свободных площадей, $K > 1$ $K = S_{\text{П}} / S_{\text{Ф}}$, $S_{\text{П}}$ – прогнозируемая площадь изъятия земель под технологический комплекс; $S_{\text{Ф}}$ – свободная площадь на территории инфраструктуры.	Матричный (низкий–средний–высокий)
Геологические	Месторождение	Неподтверждение: запасов и качества ПИ, содержания и структурно-текстурных свойств ПИ; формы залегания и числа рудных тел (пластов); геологических свойств ПИ и вмещающих пород; гидрогеологических условий. Наличие природных флюидов	Повышение достоверности: горно-геологических условий; технологических и геомеханических свойств полезных ископаемых и пород; геодинамических характеристик горного массива; гидродинамических режимов подземных вод. Нейтрализация вредных веществ	Перевод запасов в более высокую степень разведанности. Инструментальный мониторинг	$C_2 \rightarrow C_1 \rightarrow B \rightarrow A$	Технико-экономическое обоснование кондиций с учетом результатов доразведки

Продолжение таблицы 1

<p>Технологические, условия, зависящие от производственной структуры горнодобывающего комплекса</p>	<p>Карьерное пространство</p>	<p>Оползни уступов и бортов; нарушение транспортных, энергетических и других коммуникаций; обводненность и затопление рабочей зоны; опасное загрязнение карьерной атмосферы</p>	<p>Увеличение ширины площадок и берм безопасности; уменьшение угла откоса уступов; создание подпора; разделение уступов на подступы. Реконструкция водоотлива</p>	<p>Отсутствие оползней уступов и бортов. Состояние рабочей зоны карьера, обеспечивающее плановую добычу сырья. Визуальное и инструментальное наблюдение за состоянием бортов, уступов, откосов и водоотлива</p>	<p>Углы наклона бортов и откосов уступов, учитывающие: прочностные свойства пород и горного массива; обводненность борта и поровое давление в породном массиве; коэффициенты фильтрации; интенсивность водопритока. Определение устойчивых углов бортов и откосов уступов с использованием моделей и/или функциональных закономерностей или корреляционных зависимостей с указанием их доверительных интервалов</p>	<p>Мониторинг: прочностных свойств пород и горного массива; структур различных рангов; гидрогеодинамических режимов подземных вод и источников их питания; вторичного НДС в приконтурной зоне; параметров буровзрывных работ при установке уступов в предельное состояние</p>
	<p>Приконтурная зона карьера</p>	<p>Заколы в бортах. Проседание поверхности</p>	<p>Формирование устойчивого положения бортов карьера за счет: расширения площадок на уступах; уменьшения угла откоса уступов; разделения уступов на подступы</p>	<p>Отсутствие деформаций в приконтурной зоне. Комплекс маркшейдерских, геотехнических, гидрогеологических наблюдений. Визуальные и инструментальные наблюдения за состоянием бортов</p>	<p>Углы наклона бортов и откосов уступов, учитывающие: вторичное НДС в приконтурной зоне; гидрогеодинамический режим подземных вод и источников их питания; коэффициенты интенсивности водопритока</p>	<p>Мониторинг: прочностных свойств горного массива; вторичного НДС в приконтурной зоне; гидрогеодинамического режима подземных вод и источников их питания; коэффициентов фильтрации</p>

Продолжение таблицы 1

Факторы риска	Объекты рисков	Виды рисков	Способ снижения риска	Индикаторы защищенности		Способы оценки
				вербальный	количественный	
Технологические, условия, зависящие от производственной структуры горнодобывающего комплекса	Отвалы	Нарушение устойчивости: оползни отвальных уступов; выдавливание основания; проседание поверхности отвала	Уменьшение углов откоса и высоты отвала. Создание предотвала. Учет: наклона повехрности основания; наличия подработанного пространства	Устойчивое и рабочее состояние отвала. Комплекс маркшейдерских, геотехнических, гидрогеологических наблюдений	Оценка адекватности фактических условий отвалообразования проектным. Оценка НДС отвалов и их оснований	Мониторинг: физико-механических свойств пород отвала; гидродинамического режима в теле отвала
	Дробильно-обогажительная фабрика (ДОФ)	Отклонение от планового: фактического содержания компонентов в концентрате и хвостах; извлечения металла в концентрат и потерь в хвостах	Корректировка режима обогащения на основе уточненных геоданных	Контроль за стабильностью технологического процесса	Отклонения содержания в готовой продукции и хвостах, выход концентрата	Уточнение: технологических свойств полезного ископаемого; химического состава; структурно-текстурного строения

Окончание таблицы 1

Технологические, условия, зависящие от производственной структуры горнодобывающего комплекса	Гидроотвалы, хвосто- и шламоохранилища, пруды-накопители	Деформация тела, поверхности и внешних откосов дамбы; оползание склонов; перелив воды через гребень дамбы; увеличение объема фильтра	Мониторинг водного режима и отклонений от допустимых технологических параметров гидроотвальных работ. Исключение подземной подработки естественного основания	Устойчивое положение внешних откосов. Объем фильтра	Прочностные свойства пород дамбы. Уровень депрессионной поверхности. Гидравлическое давление в основании дамбы. Коэффициент фильтрации. Поровое давление. Горизонтальные смещения в откосе	Методы гидрогеомеханического, маркшейдерского и технологического контроля. Разработка гидрофиль-грационной модели, учитывающей поровое давление
Экологические	Окружающая среда: земельные, лесные, охотничьи и рыбные ресурсы; открытые и подземные водоемы, грунтовые воды; окружающий атмосферный воздух	Нарушение ландшафта; загрязнение почв и техногенных грунтов; загрязнение открытых и подземных водоемов, грунтовых вод; нарушение гидрогеохимических процессов на горно-промышленной территории; истощение минеральных и водных ресурсов	Создание искусственных геохимических барьеров. Имобилизация тяжелых металлов. Мероприятия по нейтрализации кислых вод. Обустройство каскада прудов-осветлителей	Нормы ПДК	Уровни ПДК для разных объектов внешней среды	Мониторинг концентраций. Разработка методов снижения негативных явлений и процессов

в непредсказуемости получения достоверных результатов, вероятность которых не гарантирована даже при использовании в расчетах точных значений аргументов (параметров и показателей).

Негативные явления при недропользовании, проявляющиеся в виде деформаций бортов и отвалов, обрушения отдельных уступов или их групп, разрушения транспортных и энергетических коммуникаций, камнепада, отклонения технологического процесса обогащения от запроектированного, нарушения техногенных объектов и эколого-биологической среды целесообразно классифицировать как техногенные катастрофы индустриального характера.

Систематизация рисков, сопровождающих разработку месторождений твердых полезных ископаемых, по инфраструктурным, геологическим, технологическим и экологическим факторам позволяет выявить движущую силу конкретного негативного процесса, на этапе его зарождения и развития определить характеристики и разработать мероприятия по управлению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моисеев Н. Н. Судьба цивилизации. Путь Разума. М.: МНЭПУ, 1998. 228 с.
2. He X., Montillet J., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources // *Journal of Geodynamics*. 2017. Vol. 106. P. 12–29.
3. Ланцов А. Е. Инфраструктура: понятие, виды и значение // *Экономика, статистика и информатика*. 2013. № 3(47). С. 47–52.
4. Фомичев Е. С. Риски в сфере основной деятельности горнодобывающих предприятий // *Горная промышленность*. 2003. № 6(48). С. 23–27.
5. Боярко Г. Ю. Стратегические отраслевые риски горно-добывающей промышленности: автореф. дис. ... д-ра экон. наук. Томск, 2002. 43 с.
6. Смирнова В. И., Скороход А. Ю. Операционные риски, объекты и источники возникновения // *Novainfo*. 2017. № 64. С. 135–138. URL: <https://novainfo.ru/article/12827> (дата обращения: 13.04.2022).
7. Десять рисков для компаний металлургической и горнодобывающей отраслей. URL: <http://finance.tltnews.ru/news/article20C38/default.asp> (дата обращения: 26.08.09).
8. Лушников В. Н., Селиванов Д. А., Бережной В. П. Надежность прогнозирования геотехнических рисков при ведении открытых горных работ // *Горный журнал*. 2023. № 1. С. 4–13.
9. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Сабянин Г. В. Методология определения сложности структуры рудных месторождений как объекта разработки // *ФТПРПИ*. 2012. № 6. С. 75–86.
10. Господариков А. П., Киркин А. П., Трофимов А. В., Ковалевский В. Н. Определение физико-механических свойств горных пород при применении противоударных разгрузочных мероприятий // *Горный журнал*. 2023. № 1. С. 26–34.
11. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSJ // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 11. Iss. 3. P. 445–463.
12. Мазуров Б. Т. Математическое моделирование при исследовании геодинамики. Новосибирск: Сибпринт. 2019. С. 59, 282, 291.
13. Цветкова А. Ю. Обзор основных рисков предприятий горнодобывающей и металлургической отраслей в современных условиях // *Записки горного института*. 2011. Т. 194. С. 339–342.
14. Шаклеин С. В., Рогова Т. Б. Оценка риска пользования недрами. Кемерово, 2009. 123 с.
15. Зубков А. В., Сентябов С. В. Астрофизическая и другие компоненты напряжений горных массивов // *Известия вузов. Горный журнал*. 2022. № 2. С. 70–81. DOI: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81
16. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GS1 – 2018 edition // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. P. 1–19.
17. Руководство по проектированию бортов карьера / [Питер Стейси и др.]; под ред. Джона Риды, Питера Стейси; пер. с англ. Екатеринбург: Правовед: Полиметалл, 2015. 527 с.
18. Кубиньски В., Петров А., Сала Д., Савон Д. Ю. Анализ рисков в горнодобывающей промышленности, связанных с безопасностью работы // *ГИАБ*. 2017. № 11. С. 168–176.
19. Диев В. С. Философская парадигма риска // *ЭКО*. 2008. № 11. С. 27–39.

Поступила в редакцию 20 февраля 2023 года

Сведения об авторах:

Аленичев Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник аналитической группы Института горного дела УрО РАН. E-mail: alenichev@igduran.ru; <https://orcid.org/0000-0002-4303-728X>

Systematization of industrial technogenic risks at mining enterprises

Viktor M. Alenichev¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research objective is to develop a general approach to systematizing the signs of mining territories, natural and man-made features safety.

Research relevance is due to the need to ensure the safety of economic activity in the territory of mining.

Methods of research. Subsoil use implies taking into account multiple factors that lead to the risk of decisions implementation. Risk is considered as a potential, numerically estimated probability of the unfavorable events (situations), their consequences in the form of accidents, human casualties, losses, damages, material losses, etc. Risk is a quantitative assessment of the hazards characterizing a situation with uncertain outcome and obligatory manifestation of unfavorable consequences. It is advisable to assess the safety status of any mining enterprise site by a number of indicators that characterize the system's resilience to negative impacts caused by infrastructural, natural, geological, technological, economic and financial factors. The risk situation caused by statistical processes is associated with accompanying conditions: the presence of uncertainty, the need for an alternative choice, and the possibility of accepted options (alternatives) probabilistic evaluation. Negative phenomena in subsoil use are manifested in the form of deformation of pit walls and dumps, collapse of an individual or a group of pit benches, destruction of transport lines and power supply utilities, rockfall, beneficiation process flow deviations from the designed one, violations of man-made features and the ecological and biological environment, which should be interpreted as man-made disasters of an industrial nature.

Results. The classification of risks as a multidimensional category is justified by the factors (causes) of occurrence, the driving force of which generates a negative process and determines its characteristics or individual features.

Conclusions. The systematization of various risks based on infrastructural, mining-geological, process flow and environmental factors ensures, at the initial stage of risk formation, the determination of their characteristics and the development of a system of management measures to ensure the sustainable functioning of a mining enterprise.

Keywords: risk; monitoring; infrastructural factors; geological factors; process factors; geomechanical factors; environmental factors; types of risks; safety indicators; man-made features.

The research has been carried out on theme 2 (State task no. 075-00412-22PR), registration number 123012300006-0.

REFERENCES

1. Moiseev N. N. *The fate of civilization. The Path of Reason*. Moscow: MNEPU Publishing; 1998. (In Russ.)
2. He X., Montillet J., Fernandes R., Bos M., Yu K., Hua X., Jiang W. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*. 2017; 106: 12–29.
3. Lantsov A. E. Infrastructure: concept, types and value. *Ekonomika, statistika i informatika = Economics, Statistics and Computer Science*. 2013; 3 (47): 47–52. (In Russ.)
4. Fomichev E. C. Risks in the sphere of the main activity of mining enterprises. *Gornaia promyshlennost = Mining Industry*. 2003; 6(48): 23–27. (In Russ.)
5. Boiarko G. Iu. *Strategic sectoral risks of the mining industry: DSc in Economics abstract of diss.* Tomsk; 2002. (In Russ.)
6. Smirnova V. I., Skorokhod A. Iu. Operational risks, objects and sources of occurrence. *NovaInfo*. 2017; 64: 135–138. (In Russ.) Available from: <https://novainfo.ru/article/12827> [Accessed 13 April 2022].
7. *Ten risks for companies in the metallurgical and mining industries*. (In Russ.) Available from: <http://finance.tltnews.ru/news/article20C38/default.asp> [Accessed 26 August 2009].
8. Lushnikov V. N., Selivanov D. A., Bereznoi V. P. Reliable prediction of geotechnical risks in open pit mining. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2023; 1: 4–13. (In Russ.)
9. Trubetskoi K. N., Galchenko Iu. P., Sabianin G. V. Evaluation methodology for structural complexity of ore deposits as development targets. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh = Journal of Mining Science*. 2012; 6: 75–86. (In Russ.)

10. Gospodarikov A. P., Kirkin A. P., Trofimov A. V., Kovalevskii V. N. Determination of physical and mechanical properties of rocks using anti-burst distress measures. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2023; 1: 26–34. (In Russ.)
11. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018; 11(3): 445–463.
12. Mazurov B. T. *Mathematical modelling in geodynamics research*. Novosibirsk: Sibprint Publishing; 2019. p. 59, 282, 291. (In Russ.)
13. Tsvetkova A. Iu. Overview of the main risks of mining and metallurgical enterprises. *Zapiski gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2011; 194: 339–342. (In Russ.)
14. Shaklein S. V., Rogova T. B. *Assessment of the risk of subsoil use*. Kemerovo; 2009. (In Russ.)
15. Zubkov A. V., Sentiabov S. V. Astrophysical and other components of rock mass stress. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2022; 2: 70–81. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2022-3-70-81
16. Hoek E., Brown E. T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018: 1–19
17. Peter Stacy et al. *Guide to the design of quarry sides. Translation from English*. Ekaterinburg: Pravoved: Polimetall Publishing; 2015. (In Russ.)
18. Kubinski V., Petrov A., Sala D., Savon D. Iu. Analysis of hazards in the mining industry. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2017; 11: 168–176. (In Russ.)
19. Diev V. S. Philosophical paradigm of risk. *ECO*. 2008; 11: 27–39. (In Russ.)

Received 20 February 2023

Information about the author:

Viktor M. Alenichev – DSc (Engineering), Professor, chief researcher of the analytical group, Institute of Mining UB RAS. E-mail: alenichev@igduran.ru

Для цитирования: Аленичев В. М. Систематизация техногенных рисков индустриального характера на горнодобывающих предприятиях // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 97–112. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-97-112

For citation: Alenichev V. M. Systematization of industrial technogenic risks at mining enterprises. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 97–112 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-97-112

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 004.05

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-113-126

Разработка инфраструктуры для проведения юнит-тестирования программной реализации системы управления дегазационной вакуум-насосной станцией

Абдрахманов М. И.^{1*}, Гардт Д. А.¹

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: marat-ab@mail.ru

Реферат

Цель работы. Разработка системы автоматизации тестирования программной реализации технологического алгоритма работы системы управления дегазационной вакуум-насосной станцией угольной шахты.

Актуальность. Вакуум-насосная станция является важнейшим компонентом дегазационной системы шахты, от корректности ее функционирования зависит работа системы дегазации. Ключевым компонентом системы автоматизации вакуум-насосной станции является программируемый логический контроллер с развернутым на нем соответствующим программным обеспечением. Очень важно, чтобы программная реализация технологического алгоритма работы системы была корректной. Для проверки соответствия реализации требованиям, как правило, применяется ручное тестирование по заранее составленному тест-плану, который формируется на основании требований к системе. Ручное тестирование имеет ряд недостатков: данный процесс имеет значительную длительность по времени; в ходе проведения тестирования возможны ошибки из-за человеческого фактора; такой тип тестирования возможен только при наличии тестового стенда и/или собранного образца системы управления. Требования к алгоритму могут быть изменены в процессе разработки программы, а также на этапах наладки и ввода в эксплуатацию, что значительно усложняет процесс тестирования.

Результаты. Для решения задачи автоматизации тестирования программной реализации технологического алгоритма необходимо изолировать технологический алгоритм управления от программных компонент, которые отвечают за работу с аппаратным обеспечением, и предоставить к нему доступ через стандартные интерфейсы (OPC UA). Дополнительное технологическое оборудование (завдвижки и т. д.), используемое в системе автоматизации, следует реализовать в виде программных эмуляторов с возможностью задания их режимов работы. Создав дополнительно программный слой взаимодействия с технологическим алгоритмом и эмулятором на языке программирования с развитыми инструментами для тестирования (Python), можно реализовать сценарии тестирования из тест-плана на этом языке, что позволит выполнять тестирование не вручную, а в автоматическом режиме.

Выводы. Предлагаемый подход к автоматизации работы по тестированию программной реализации технологического алгоритма позволит значительно упростить процесс разработки программного обеспечения для такого вида систем автоматизации и управления.

Ключевые слова: дегазация; вакуум-насосная станция; автоматизация; тестирование; ручное тестирование; автоматизированное тестирование.

Введение. На современных угольных шахтах одним из главных приоритетов является безопасность ведения горных работ. Значительная часть аварий, которые

происходят на угольных предприятиях, связана со взрывом метана. Метан – часть рудничного газа, который выделяется из угля и горных пород в горные выработки. Накапливаясь в закрытом помещении, смесь метана с воздухом может стать взрывоопасной [1, 2].

Одним из способов борьбы с метаном является дегазация угольных пластов [2, 3]. Дегазационная система шахты – это комплекс технических средств, предназначенный для изолированного от атмосферы шахты отвода метановоздушной смеси на поверхность. Важнейшим компонентом дегазационной системы является вакуум-насосная станция (ВНС), она создает вакуум, за счет которого смесь извлекается из угольного пласта или выработанного пространства и транспортируется на поверхность [4–7], (*Инструкция по дегазации угольных шахт (РД-15-09-2006). Сер. 05. Вып. 22. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности, 2012. 250 с.*). От исправности функционирования ВНС зависит работоспособность всей системы дегазации.

Система автоматизации работы ВНС предполагает решение задач контроля, управления, регулирования и защиты в объеме, требуемом для конкретной установки [4].

Техническое задание на разработку такой системы включает требования, которые могут быть формализованы в виде набора алгоритмов. Полученные алгоритмы используются в дальнейшем для разработки программного обеспечения (ПО) для программируемого логического контроллера (ПЛК), являющегося центральным компонентом системы автоматизации.

Разработка ПО, как правило, ведется на этапе, когда еще нет готового аппаратного комплекса, включающего ПЛК, модули ввода/вывода и т. д. Это создает значительные трудности для тестирования корректности реализации алгоритма, которое в полном объеме может быть проведено только при наличии всех компонентов разрабатываемого комплекса.

В процессе разработки ПО часто приходится вносить изменения, которые могут затронуть уже созданные части программы. Это приводит к необходимости частого проведения полнофункционального тестирования, которое для такого типа решений выполняется преимущественно вручную, что приводит к значительным временным затратам.

Требования к алгоритму работы системы управления могут измениться в процессе разработки ПО, и даже во время наладки и ввода системы в эксплуатацию. Зачастую требуется доработка системы «по месту» из-за особенностей объекта автоматизации.

Поэтому нужен подход к тестированию ПО, который бы учитывал все эти особенности и позволял проводить тестирование реализации технологической части алгоритма системы управления в автоматическом режиме и без наличия аппаратного комплекса системы автоматизации.

В статье представлен предлагаемый нами подход к автоматизации тестирования реализации технологического алгоритма работы системы управления на примере дегазационной вакуум-насосной станции угольной шахты.

Алгоритм управления подземной дегазационной ВНС. В общем виде система автоматизации ВНС предполагает наличие следующих подсистем: контроль, управление, регулирование и защита. Системы автоматизации ВНС подземного типа (ПВНС), как правило, менее сложные по сравнению с ВНС наземного типа (*Инструкция по дегазации угольных шахт...*).

Среди управляющих воздействий, которые оказывает ПЛК через модули релейных выходов на элементы ПВНС, выделим следующие:

- разрешение на запуск вакуум-насоса 1 (реле замкнуто), остановка вакуум-насоса 1 (реле разомкнуто), реализуется через релейный выход 1 (DO1);
- разрешение на запуск вакуум-насоса 2 (реле замкнуто), остановка вакуум-насоса 2 (реле разомкнуто), реализуется через релейный выход 2 (DO2);
- сигнал «Авария», используется для сигнализации и/или передачи сторонним системам информации об аварийном состоянии, реализуется через релейный выход 3 (DO3).

Для управления подачей метановоздушной смеси в ПВНС используется поворотный затвор (далее ПЗ), который может управляться через интерфейс RS485 (протокол Modbus). Система дополнительно оборудована кнопочным постом для подачи дискретных сигналов в ПЛК для открытия/закрытия затвора.

В качестве ПЛК выберем вариант с возможностью программирования на языках из группы МЭК, например поддерживающий среду Codesys [8].

Выделим сокращенный набор требований к работе ПВНС:

- если концентрация метана в смеси на входе в ПВНС находится в диапазоне 3–25 %, то остановить насосы Н1 и Н2, активировать сигнал «Авария» и закрыть ПЗ;

- если концентрация метана в смеси на входе в ПВНС находится в диапазоне 0–3 % или больше 25 %, то подать разрешение на запуск насосов Н1 и Н2, деактивировать сигнал «Авария», если он был активен, и снять управление с ПЗ;

- если давление на выходе насоса Н1 выше верхней аварийной уставки, то активировать сигнал «Авария»;

- если давление на выходе насоса Н1 ниже верхней аварийной уставки, то деактивировать сигнал «Авария», если он был активен;

- если давление на выходе насоса Н2 выше верхней аварийной уставки, то активировать сигнал «Авария»;

- если давление на выходе насоса Н2 ниже верхней аварийной уставки, то деактивировать сигнал «Авария», если он был активен;

- если хотя бы один из насосов Н1 или Н2 был в работе, а в данный момент оба насоса остановлены, то закрыть ПЗ;

- если оба насоса были остановлены, и в данный момент насосы остановлены, то не оказывать воздействие на ПЗ;

- если ПЗ не открыт (угол открытия < 5 %), то остановить насосы Н1 и Н2 и заблокировать возможность их запуска, иначе подать разрешение на запуск насосов Н1 и Н2;

Формализуем эти требования в виде диаграммы видов деятельности UML [9, 10], которая представлена на рис. 1.

Особенности процесса разработки ПО для систем контроля и управления.

Основные трудности, с которыми сталкивается разработчик ПО для систем контроля и управления, перечислены во введении. Также следует отметить, что в ряде технических средств, на базе которых разрабатываются системы автоматизации, нет инструментов для разработки тестов и запуска их в изоляции от аппаратного обеспечения. Как уже было отмечено, в этом случае для полноценного тестирования требуется собрать программно-аппаратный комплекс с соответствующим ПЛК и, при необходимости, стенд для тестирования. Тестирование в этом случае выполняется преимущественно вручную.

Тестирование реализации технологического алгоритма работы системы управления ПВНС. На этапе проектирования системы автоматизации, как правило, уже известно количество и тип входных и выходных сигналов, а также оборудование, управление которым будет производиться. Исходя из этого выбирается тот или иной тип ПЛК и состав его модулей. При этом требования к алгоритму

управления могут быть не полными и в процессе работы над проектом могут измениться.

Это влияет на ПО для ПЛК такой системы. Условно в ПО можно выделить две части, одна из них изменяется редко, она связана с настройкой под конкретный состав модулей и набор сигналов. Вторая изменяется часто, в рамках нее реализуется технологический алгоритм, решающий задачи контроля, управления,

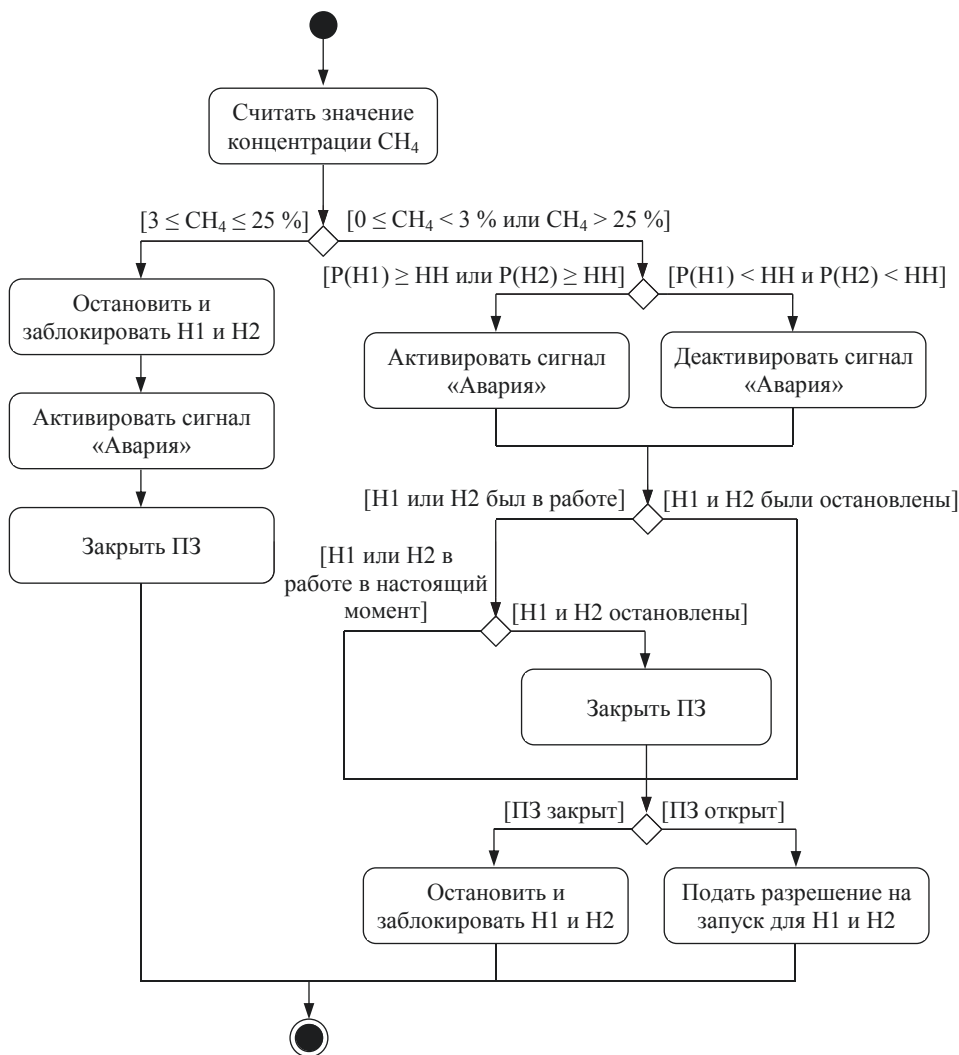


Рисунок 1. Требования к работе ПВНС в виде диаграммы видов деятельности
 Figure 1. Requirements for an underground vacuum pumping station operation in the form of an activity diagram

регулирования и защиты. С тем, насколько качественно реализован технологический алгоритм, напрямую связана работоспособность всей системы автоматизации. Поэтому задача тестирования корректности реализации алгоритма является очень важной. Под корректностью в данном случае понимается соответствие программной реализации набору требований, которые предъявляются к системе (исходному алгоритму), и отсутствие в ней (реализации) ошибок.

Часто встречающийся на практике подход к тестированию ПО выглядит следующим образом: после формализации требований к ПО системы они (требования) передаются в отдел тестирования, в котором на их основе формируется список сценариев тестирования (тест-кейсов) — различных вариантов исходных данных и предполагаемого поведения системы. Этот список составляет тест-план, по которому тестировщик проверяет систему [11, 12].

Каждый тест-кейс описывается по определенному шаблону, который включает предусловия, набор действий для выполнения теста, проверку результатов работы и постусловия.

Составим список тест-кейсов для проверки требований к работе ПВНС (данный список не является полным).

Тест № 1. Запуск установки при нормальных условиях.

Тест № 2. Попадание значения концентрации СН₄ в диапазон от 3 до 25 %.

Тест № 3. Попадание значения концентрации СН₄ в диапазон от 0 до 3 % или выше 25 %.

Тест № 4. Возникновение давления на выходе насоса Н1 больше аварийного порога либо равного ему.

Тест № 5. Давление на выходе насоса Н1 меньше аварийного порога.

Тест № 6. Возникновение давления на выходе насоса Н2 больше аварийного порога либо равного ему.

Тест № 7. Давление на выходе насоса Н2 меньше аварийного порога.

Тест № 8. Один из насосов Н1 или Н2 был в работе, в данный момент оба насоса остановлены.

Тест № 9. Установка остановлена. Нажата кнопка «Закрыть ПЗ».

Тест № 10. Установка работает. Нажата кнопка «Закрыть ПЗ».

Тест № 11. Установка остановлена. Нажата кнопка «Открыть ПЗ».

Тест № 12. Установка работает. Нажата кнопка «Открыть ПЗ».

Тест № 13. На ПЗ отправлена команда «Закрыть», но он не закрылся.

Тест № 14. На ПЗ отправлена команда «Открыть», но он не открылся.

Пример развернутого описания теста.

Название: «Тест № 2. Попадание значения концентрации СН₄ в диапазон от 3 до 25 %».

Предусловия:

- установка работает;
- концентрация СН₄ равна 0 %;
- ПЗ открыт.

Действия:

- выставить значение СН₄ в диапазоне от 3 до 25 %.

Реакция системы:

- DO1 (насос 1) — разомкнут;
- DO2 (насос 2) — разомкнут;
- DO3 («Авария») — замкнут;
- ПЗ закрыт.

Постусловия:

- выставить СН₄ в значение, равное 0 %.

Основные недостатки ручного тестирования заключаются в том, что:

- процедура тестирования при большом количестве тест-кейсов может занимать значительное время;
- в процессе ручного тестирования из-за человеческого фактора могут возникать ошибки;

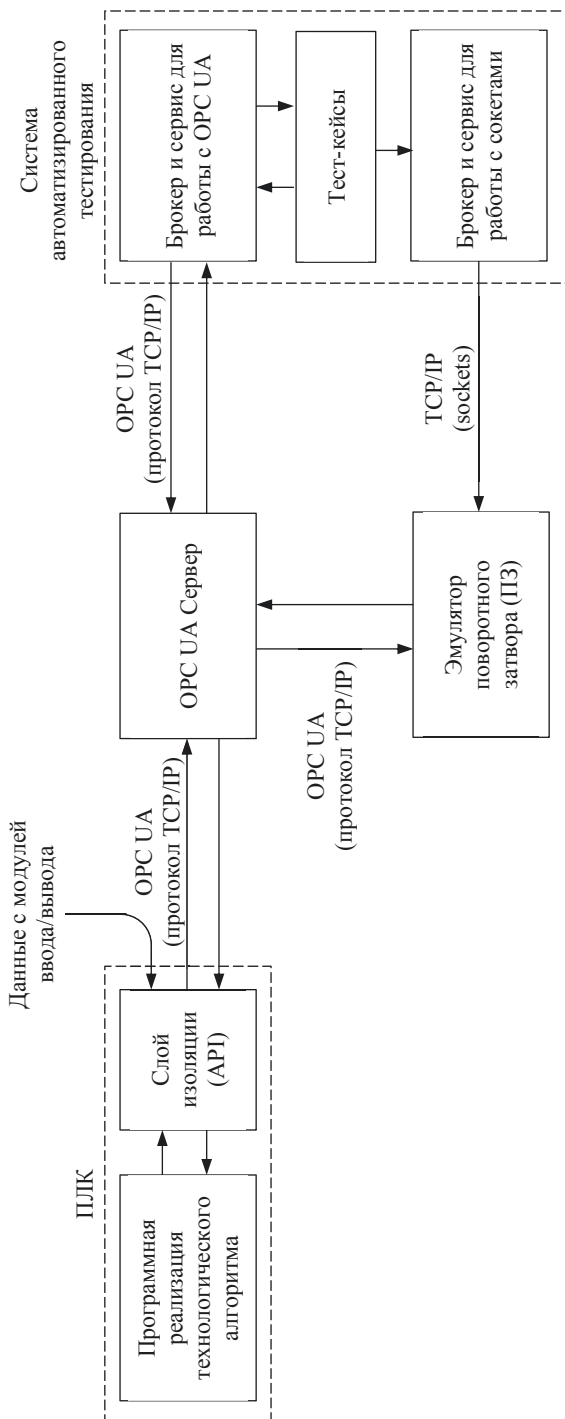


Рисунок 2. Система автоматизации тестирования технологического алгоритма ПВНС
 Figure 2. Test automation system for an underground vacuum pumping station process algorithm

– для полноценного тестирования необходимо наличие тестового стенда.

Для повышения надежности и качества ПО необходимо автоматизировать процесс тестирования.

Автоматизация процесса тестирования технологического алгоритма.

Для автоматизации процесса тестирования необходимо:

– изолировать технологический алгоритм от системного слоя программы, что позволит при необходимости изменять источники и приемники данных без изменения самого технологического алгоритма;

– обеспечить возможность тестирования технологического алгоритма без аппаратного обеспечения;

– эмулировать работу управляемого технологического оборудования (поворотный затвор и т. д.);

– реализовать на доступном языке программирования: слой взаимодействия с технологическим алгоритмом, реализованным в рамках ПЛК; необходимый набор тест-кейсов.

Общий вид системы автоматизации тестирования технологического алгоритма ПВНС представлен на рис. 2.

Изоляция технологического алгоритма работы ПВНС. Основная идея изоляции технологического алгоритма работы ПВНС заключается в том, что доступ к контролируемым и управляемым параметрам системы должен осуществляться не напрямую (через связанные с входами/выходами ПЛК переменными), а посредством соответствующих функций.

Далее представлена часть программы, которая проверяет концентрацию метана в смеси и вырабатывает необходимые управляющие воздействия. При этом получение значения концентрации метана и управление производятся через переменные, связанные напрямую с входами/выходами ПЛК:

```
IF (CH4_AI >= 3 AND CH4_AI <= 25) THEN
  H1_DO := FALSE; // разомкнуть DO1 (насос 1)
  H2_DO := FALSE; // разомкнуть DO2 (насос 2)
  AVR_DO := TRUE; // замкнуть DO3 (сигнал «Авария»)
  IS_METH_OK := FALSE;
  CLOSE_ZVR(); // закрыть ПЗ
END_IF
```

Для создания слоя изоляции технологического алгоритма заменим переменные на функции:

```
IF (GET_CH4() >= 3 AND GET_CH4() <= 25) THEN
  SET_H1_STATE(FALSE);
  SET_H2_STATE(FALSE);
  SET_AVR_STATE(TRUE);
  IS_METH_OK := FALSE;
  CLOSE_ZVR();
END_IF
```

В этом случае вся работа с оборудованием и/или программными интерфейсами, через которые поступают и передаются данные, будет производиться в созданном наборе функций, что позволит при необходимости подменять источники и приемники данных без внесения изменений в технологический алгоритм.

Обеспечение возможности тестирования технологического алгоритма без аппаратного обеспечения. Некоторые средства разработки ПО для ПЛК, например такие как Codesys, позволяют запускать разработанные решения в среде, развернутой в операционной системе Windows, благодаря чему возможно какое-то время обходиться без аппаратного ПЛК. Если такой возможности нет, то посредством изоляции технологического алгоритма разработку можно вести с использованием ПЛК без набора модулей ввода/вывода, датчиков и других аппаратных элементов системы. В обоих этих случаях эмуляцию сигналов можно реализовать через интерфейс OPC UA [13, 14] либо какой-то иной способ связи ПЛК и персонального компьютера, который предоставляет производитель конкретного оборудования. Технологический алгоритм при этом не поменяется, изменится лишь содержание функций слоя изоляции (GET_CN4(), SET_H1_STATE() и т. д.). В этом случае данные будут считываться не с аппаратных модулей ввода/вывода, а через OPC UA теги, значения которых можно задавать через внешнее ПО.

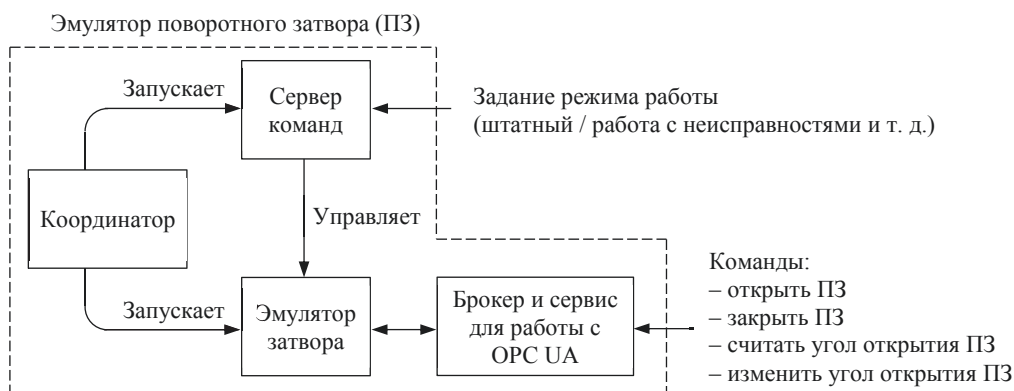


Рисунок 3. Структурная схема эмулятора ПЗ
Figure 3. Block diagram of a rotary gate emulator

Эмуляция работы управляемого технологического оборудования. Зачастую в состав системы автоматизации входит различное технологическое оборудование, которым необходимо управлять и контролировать его состояние. Это могут быть сложные устройства с нетривиальной логикой поведения. В системе автоматизации ПВНС таким устройством является поворотный затвор, управление которым должно осуществляться с ПЛК. В этом случае для выполнения полноценного автоматизированного тестирования реализации технологического алгоритма необходимо создать эмулятор, имитирующий работу такого устройства. Помимо штатной работы, эмулятор должен позволять имитировать различные нештатные ситуации, например: «был подан сигнал на ПЗ «закрыть», а он не закрылся». В реальности это может произойти по разным причинам: нарушение связи между ПЗ и ПЛК, отсутствие воздуха в пневмосистеме ПЗ (если это пневматический затвор) и т. д.

Работу эмулятора ПЗ с ПЛК проще всего реализовать через OPC UA интерфейс, посредством которого на эмулятор будут подаваться команды «открыть/закрыть ПЗ», а также будет считываться и изменяться текущий угол открытия затвора.

Система автоматизированного тестирования должна иметь возможность активации на эмуляторе ПЗ различных нештатных ситуаций, которые были перечислены

ранее. Для имитации такого поведения лучше организовать отдельный канал для передачи соответствующих команд в эмулятор, например через сетевые сокеты, как правило, все современные языки программирования их поддерживают, либо воспользоваться каким-нибудь другим механизмом межпроцессного взаимодействия. Структурная схема эмулятора представлена на рис. 3.

Реализация слоя взаимодействия системы автоматизированного тестирования и технологического алгоритма на ПЛК и тест-кейсов для проверки корректности решения. Слой интеграции представляет собой набор программных модулей, представляющих интерфейс, и модели данных для взаимодействия функций программы, представляющих тест-кейсы с реализацией технологического алгоритма на ПЛК. В нашем случае была принята схема, представленная на рис. 2 – блок «Система автоматизированного тестирования». Брокеры – это программные компоненты, которые реализуют операции чтения/записи через интерфейс OPC UA и сетевые сокеты системы. На уровне брокеров не осуществляются проверки принимаемых и получаемых данных. Такого типа проверки реализуются на уровне базовых сервисов, которые осуществляют (при необходимости) структурную и логическую валидацию данных.

```
C:\Users\Danil\Desktop\autotests>py -m pytest --verbose
===== test session starts =====
platform win32 -- python 3.9.7, pytest-7.1.2, pluggy-1.0.0 -- C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio\Shared\Python39_64\python.exe
cachedir: .pytest_cache
rootdir: C:\Users\Danil\Desktop\autotests
collected 12 items

tests/test_plc.py::test_check_ch4_in_range_from_3_to_25_percent PASSED [ 8%]
tests/test_plc.py::test_check_ch4_in_range_between_0_to_3_and_gt_25 PASSED [ 16%]
tests/test_plc.py::test_pressure_on_pump_1_or_2_more_than_HH PASSED [ 25%]
tests/test_plc.py::test_pressure_on_pump_1_or_2_less_than_HH PASSED [ 33%]
tests/test_plc.py::test_if_H1_or_H2_was_working_and_now_both_of_them_stopped_then_close_zvr PASSED [ 41%]
tests/test_plc.py::test_close_ZVR_button_pressed_on_stopped_station PASSED [ 50%]
tests/test_plc.py::test_close_ZVR_button_pressed_on_working_station PASSED [ 58%]
tests/test_plc.py::test_open_ZVR_button_pressed_on_stopped_station PASSED [ 66%]
tests/test_plc.py::test_open_ZVR_button_pressed_on_working_station PASSED [ 75%]
tests/test_plc.py::test_to_ZVR_close_command_was_sent_but_its_not_closed PASSED [ 83%]
tests/test_plc.py::test_to_ZVR_open_command_was_sent_but_its_not_opened PASSED [ 91%]
tests/test_plc.py::test_if_ZVR_is_not_opened_then_off_D01_and_D02_else_D01_and_D02_on PASSED [100%]

===== 12 passed in 109.51s (0:01:49) =====
```

Рисунок 4. Вывод результатов тестирования
Figure 4. Test results output

Для реализации системы автоматизированного тестирования выбран язык программирования Python с учетом его простоты, достаточного количества необходимых библиотек и удобного каркаса тестирования (pytest) [15].

Программная реализация тест-кейса «Тест № 2. Попадание значения концентрации СН₄ в диапазон от 3 до 25 %» имеет следующий вид:

```
def test_check_ch4_in_range_from_3_to_25_percent():
    """Тест 2: Попадание значения концентрации СН4 в диапазон
    от 3 до 25 %"""
    # Предусловия
    prep_state() # установка значений контролируемых параметров
    на значения "по умолчанию"

    # Запуск установки (если была остановлена)
    # Эмулируем концентрацию СН4 = 1 %
    opcua_service.set_tag_value(ns=4, tag_name=AI_CH4_tag,
    value=1.0, tp=ua.VariantType.Float)
    # Открываем затвор (эмуляция нажатия кнопки Открыть затвор)
    open_zvr_by_button()
```

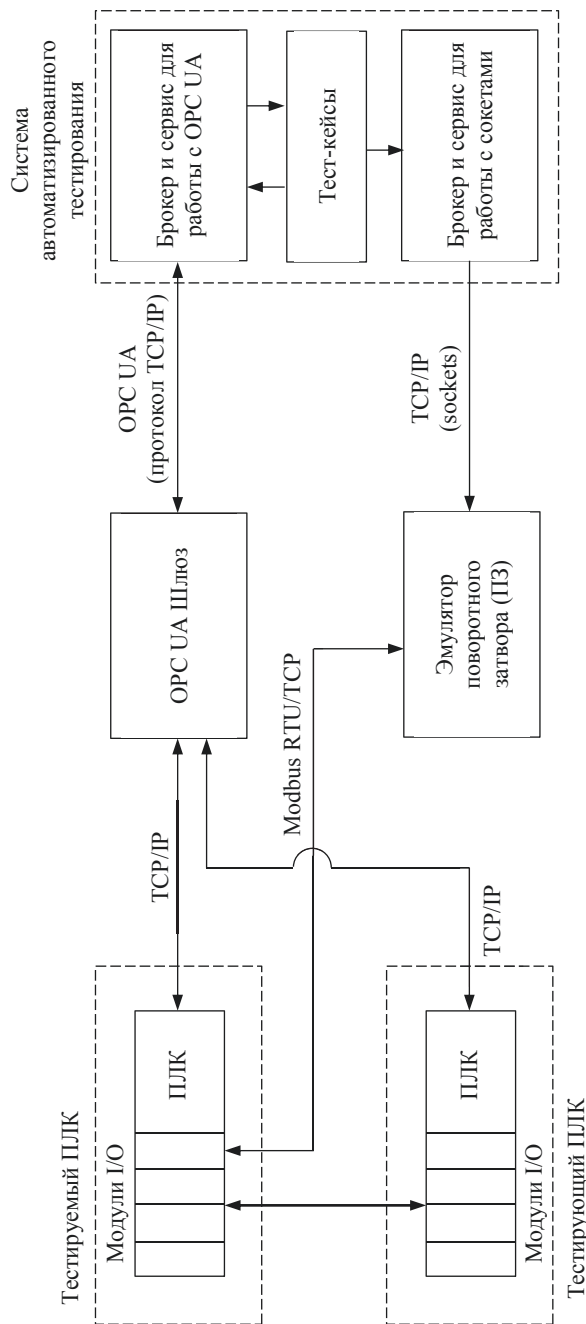


Рисунок 5. Структура системы для проведения интеграционного тестирования
 Figure 5. Structure of the integration testing system

```
# Действия
opcua_service.set_tag_value(ns=4, tag_name=AI_CH4_tag,
value=3.0, tp=ua.VariantType.Float)
time.sleep(zvr_wait) # Ждем пока закроется затвор

# Проверка реакции системы
zvr_angle = opcua_service.get_tag_value(ns=4, tag_name=zvr_
angle_tag)
DO_H1_value = opcua_service.get_tag_value(ns=4, tag_
name=DO_H1_tag)
DO_H2_value = opcua_service.get_tag_value(ns=4, tag_
name=DO_H2_tag)
DO_AVR_value = opcua_service.get_tag_value(ns=4, tag_
name=DO_AVR_tag)

assert zvr_angle <= 5
assert DO_H1_value is False
assert DO_H2_value is False
assert DO_AVR_value is True

# Постусловия
# Эмулируем концентрацию CH4 = 1 %
opcua_service.set_tag_value(ns=4, tag_name=AI_CH4_tag,
value=1.0, tp=ua.VariantType.Float)
```

Как можно видеть, приведенный программный код близок по своей структуре и содержанию словесному описанию тест-кейса, что значительно упрощает разработку такого типа программ. Остальные тест-кейсы были реализованы похожим образом.

Для запуска процесса тестирования используется программный модуль `pytest`. Если все тесты проходят проверку, то результат будет иметь вид, представленный на рис. 4, в примере было реализовано 12 тестов, все они завершились успешно.

Анализ возможности применения предлагаемого подхода в рамках других групп тестирования. В статье рассматриваются построение инфраструктуры и методика ее применения для проведения юнит-тестирования, которое, фактически, является первым уровнем группы функциональных тестов. Предлагаемый подход ограниченно применим для интеграционных тестов. Интеграционное тестирование предполагает проверку связи между компонентами системы и корректность обмена информацией между ними. Система автоматизации ВНС включает в себя ПЛК, модули ввода/вывода, датчики, исполнительные механизмы и оборудование для обеспечения связи ПЛК и SCADA-уровня. Структура системы для проведения интеграционного тестирования представлена на рис. 5. Тестирующий ПЛК – это ПЛК, через который система тестирования оказывает воздействие на модули ввода тестируемого ПЛК (через модули вывода) и осуществляет контроль срабатывания релейных выходов через модули ввода. Эмулятор поворотного затвора потребует доработать в части возможности работы по протоколу Modbus RTU/TCP.

В данном случае не предусматривается проверка с подключенными датчиками и исполнительными механизмами, так как это потребовало бы помещения их в специальную среду, состоянием которой нужно было бы управлять, что, на наш взгляд, кажется излишним. В остальном связь и корректность передачи

информации может быть проверена. Приемочное тестирование такого рода систем чаще всего проводится в ручном режиме с полным комплектом подключенного оборудования, в этом случае автоматизированное тестирование не применяется, но можно допустить, что на первом этапе приемочного тестирования может быть проверена корректность реализации алгоритма через запуск интеграционных тестов.

Что касается группы нефункциональных видов тестирования, с использованием предлагаемой инфраструктуры можно проводить тестирование надежности работы системы, для этого потребуется стенд интеграционного тестирования и модификация в компоненте «Система автоматизированного тестирования» (рис. 5), которая позволила бы запускать тесты не однократно, а в циклическом режиме.

Предлагаемый подход позволит довольно эффективно проводить тестирование, связанное с изменениями, а именно: дымовое тестирование и регрессионное тестирование. Для дымового тестирования можно выделить набор тестов, прохождение которых будет говорить об общей работоспособности и корректности алгоритма. При этом время прохождения дымового тестирования значительно меньше, чем время, которое требуется для выполнения всех тестов. Выявленные в процессе отладки и тестирования программы ошибки могут стать источником дополнительного набора тестов, которые не были учтены в процессе составления тест-плана по техническому заданию. Они будут являться базой для проведения регрессионного тестирования.

Выводы. Приведенный в статье подход к автоматизации тестирования программной реализации технологического алгоритма работы ПВНС можно применять для тестирования систем автоматизации различных технологических процессов на базе ПЛК. Это позволит значительно сократить время на ручное тестирование, уменьшить количество ошибок в программе, оперативно вносить изменения в ПО в процессе наладки и ввода системы в эксплуатацию. Данный подход позволит начать работу над реализацией технологического алгоритма с поддержкой тестирования до непосредственного развертывания ПО на аппаратном обеспечении (ПЛК). Эмуляторы работы технологического оборудования являются переиспользуемыми компонентами и, в случае необходимости, могут применяться в работе над различными проектами, которые разрабатываются в рамках предлагаемого подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рудничная вентиляция / под ред. Ушакова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1988. 440 с.
2. Карпов Е. Ф., Басовский Б. И. Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах. М.: Недра, 1994. 336 с.
3. Шевченко Л. А. Расчет параметров глубокой дегазации угольных шахт // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 45–49.
4. Карпов Е. Ф., Рязанов А. В. Автоматизация и контроль дегазационных систем. М.: Недра, 1983. 190 с.
5. Малашкина В. А., Вострикова Н. А. Анализ основных особенностей транспортирования метановоздушной смеси по подземному вакуумному дегазационному трубопроводу // ГИАБ. 2004. № 8. С. 253–257.
6. Кузнецов В. И. Механические вакуумные насосы. М.: Госэнергоиздат, 1983. 279 с.
7. Малашкина В. А. Дегазационные установки. М.: МГУ, 2007. 189 с.
8. Gary L. Pratt PE. The book of CODESYS: the ultimate guide to PLC and industrial controls programming with the CODESYS IDE and IEC 61131-3. ControlSphere LLC., 2021. 492 p.
9. Suriya Sundaramoorthy. UML diagramming: a case study approach. Auerbach Publications, 2022. 402 p.
10. Alan Dennis, Barbara Wixom, David Tegarden. Systems analysis and design: an object-oriented approach with UML. Wiley, 2020. 544 p.

11. Kristin Jackvony. The complete software tester: concepts, skills, and strategies for high-quality testing. Independently published, 2022. 512 p.
12. James D. McCaffrey. Software testing: fundamental principles and essential knowledge. Booksurge Publishing, 2009. 120 p.
13. John Rinaldi. OPC UA – unified architecture: the everyman’s guide to the most important information technology in industrial automation. CreateSpace Independent Publishing Platform., 2016. 170 p.
14. John Rinaldi. OPC UA: the Basics: an OPC UA overview for those who may not have a degree in embedded programming paperback. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2013. 76 p.
15. Brian Okken. Python testing with pytest: simple, rapid, effective, and scalable. Pragmatic Bookshelf, 2022. 274 p.

Поступила в редакцию 10 ноября 2022 года

Сведения об авторах:

Абдрахманов Марат Ильдусович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и компьютерных технологий Уральского государственного горного университета. E-mail: marat-ab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0391-6204>
Гардт Даниил Алексеевич – магистрант кафедры информатики Уральского государственного горного университета. E-mail: 2g0d0a0@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-113-126

Developing a unit testing framework for control system software implementation of a degassing vacuum pumping station

Marat I. Abdrakhmanov¹, Daniil A. Gardt¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Research objective is to develop a test automation system for the process algorithm software implementation of the degassing vacuum pumping station control system operation at a coal mine.

Relevance. The vacuum pumping station is an essential component of a mine degassing system. Degassing system operation depends on its correct functioning. A programmable logic controller with appropriate software is a key component of the vacuum pumping station automation system. Correct software implementation of the system operation process algorithm is of primary importance. To verify the compliance of the implementation with the requirements, manual testing is commonly used according to a pre-compiled test-plan, which is formed based on the requirements imposed on the system. Manual testing has a number of disadvantages. It is a long process where human errors are likely to occur, and the use of a test bench and/or an assembled control system sample is inevitable. Requirements for the algorithm can be changed in the course of program development, debugging, and initiation, which greatly complicates the testing process.

Results. To solve the problem of process algorithm software implementation testing automation, the process control algorithm should be isolated from the software components responsible for the hardware. Access to the process control algorithm should be provided through standard interfaces (for example, OPC UA). Additional process equipment (valves, etc.) used in the automation system should be implemented in the form of emulators with an opportunity to assign their modes of operation. By creating an additional software layer of interaction with a process algorithm and emulator in a programming language with advanced test tools (for example, Python), it is possible to implement test scenarios from a test plan in this language. It will allow testing in automatic mode rather than manually.

Conclusions. The proposed approach to process algorithm software implementation testing automation will greatly simplify software development for this type of automation and control systems.

Keywords: degassing; vacuum pumping station; automation; testing; manual testing; automated testing.

REFERENCES

1. Ushakov K. Z. (ed.) *Mine ventilation. 2nd edition, revised and enlarged.* Moscow: Nedra Publishing; 1988. (In Russ.)

2. Karpov E. F., Basovskii B. I. *Control of ventilation and degassing in coal mines*. Moscow: Nedra Publishing; 1994. (In Russ.)
3. Shevchenko L. A. Calculation of the parameters of deep de-gassing of coal. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2011; 5: 45–49. (In Russ.)
4. Karpov E. F., Riazanov A. V. *Automation and control of degassing systems*. Moscow: Nedra Publishing; 1983. (In Russ.)
5. Malashkina V. A., Vostrikova N. A. Analyzing the main features of methane-air mixture transportation through an underground vacuum degassing pipeline. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2004; 8: 253–257. (In Russ.)
6. Kuznetsov V. I. *Mechanical vacuum pumps*. Moscow: Gosenergoizdat; 1983. (In Russ.)
7. Malashkina V. A. *Degassing units*. Moscow: MSMU Publishing; 2007. (In Russ.)
8. Gary L. Pratt PE. *The book of CODESYS: the ultimate guide to PLC and industrial controls programming with the CODESYS IDE and IEC 61131-3*. ControlSphere LLC., 2021.
9. Suriya Sundaramoorthy. *UML diagramming: a case study approach*. Auerbach Publications; 2022.
10. Alan Dennis, Barbara Wixom, David Tegarden. *Systems analysis and design: an object-oriented approach with UML*. Wiley, 2020.
11. Kristin Jackvony. *The complete software tester: concepts, skills, and strategies for high-quality testing*. Independently published; 2022.
12. James D. McCaffrey. *Software testing: fundamental principles and essential knowledge*. Booksurge Publishing; 2009.
13. John Rinaldi. *OPC UA – unified architecture: the everyman's guide to the most important information technology in industrial automation*. CreateSpace Independent Publishing Platform; 2016.
14. John Rinaldi. *OPC UA: the Basics: an OPC UA overview for those who may not have a degree in embedded programming paperback*. CreateSpace Independent Publishing Platform; 2013.
15. Brian Okken. *Python testing with pytest: simple, rapid, effective, and scalable*. Pragmatic Bookshelf; 2022.

Received 10 November 2022

Information about the authors:

Marat I. Abdrakhmanov – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Automation and Computer Technology, Ural State Mining University. E-mail: marat-ab@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0391-6204>

Daniil A. Gardt – master's student, Department of Informatics, Ural State Mining University. E-mail: 2g0d0a0@gmail.com

Для цитирования: Абдрахманов М. И., Гардт Д. А. Разработка инфраструктуры для проведения юнит-тестирования программной реализации системы управления дегазационной вакуум-насосной станцией // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 113–126. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-113-126

For citation: Abdrakhmanov M. I., Gardt D. A. Developing a unit testing framework for control system software implementation of a degassing vacuum pumping station. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 113–126 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-113-126

ИСТОРИЯ. ИНФОРМАЦИЯ. РЕЦЕНЗИИ

УДК 622.235

DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-127-133

Итоги IX научно-практической конференции взрывников Урала

Берсенов Г. П.^{1*}, Кутуев В. А.¹

¹ Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: victoria508@mail.ru

Реферат

В статье представлены результаты научно-практической конференции по горному и взрывному делу на Урале, организованной Институтом горного дела и Ассоциацией «Взрывники Урала» в рамках X Уральского горнопромышленного форума в МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО» с выездным заседанием на предприятие НАО «НИПИГОРМАШ» и экскурсиями на производственную площадку ООО «Протол», а также в АО «Невьянский цементник» и ООО «Невьянское карьероуправление» с посещением Демидовского музея и Невьянской наклонной башни. В рамках конференции заслушаны научные доклады и сообщения, посвященные вопросам безопасного недропользования и взрывного дела; уделено внимание специальным взрывным работам по сварке взрывом, обрушению зданий в строительстве; представлены новейшие разработки зарядной, буровой техники отечественного производства и эмульсионных взрывчатых веществ; доложено об исследованиях сейсмической безопасности охраняемых объектов и уступов карьеров при открытой разработке месторождений.

Ключевые слова: научно-практическая конференция; Институт горного дела УрО РАН; Ассоциация «Взрывники Урала», промышленная безопасность; буровзрывные работы; специальные взрывные работы; эмульсионные взрывчатые вещества; детонационные характеристики.

IX научно-практическая конференция с международным участием «Технология и безопасность буровзрывных работ на открытых и подземных разработках Урала» проходила 22–24 ноября 2022 г. в рамках X Уральского горнопромышленного форума в МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО» с выездным заседанием 23 ноября на предприятие НАО «НИПИГОРМАШ» [1], в г. Екатеринбург и экскурсиями 24 ноября на производственную площадку ООО «Протол» (г. Дегтярск) [2], в АО «Невьянский цементник» [3]; ООО «Невьянское карьероуправление», Демидовский музей и на Невьянскую наклонную башню (г. Невьянск) [4].

В работе конференции приняло участие 120 специалистов, представляющих 32 научно-исследовательские, образовательные и проектные организации, горные предприятия и организации взрывников Урала, Сибири, Центральной России, Башкортостана и Казахстана.

Первый день конференции. 22 ноября на площадке МВЦ «Екатеринбург-ЭКСПО» было заслушано 8 научных докладов и сообщений. С приветственным словом выступил генеральный директор Ассоциации «Взрывники Урала», кандидат технических наук *Берсенов Геннадий Порфирьевич*, он доложил о результатах работы Ассоциации «Взрывники Урала» за 2022 год и поделился опытом ведения специальных взрывных работ на Урале. Представители компании ООО «Уральский Сибирит» [5] показали участникам видеоролики о деятельности компании, производстве и применении взрывчатых веществ (ВВ) в промышленных условиях ведения буровзрывных работ (БВР) на открытых и подземных разработках.

Заведующий Лабораторией разрушения горных пород (РГП) ИГД УрО РАН, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник *Жариков Сергей Николаевич* выступил с сообщением о деятельности и направлениях исследований Лаборатории РГП. Живой интерес вызвал доклад доктора технических наук, ведущего научного сотрудника ИПКОН РАН [6] и научного консультанта ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша» (г. Москва) *Горинова Сергея Александровича* о новой разработке эмульсионного взрывчатого вещества для работы в северных и арктических регионах. Представитель ООО «Протол» кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе *Бесианошников Юрий Петрович* рассказал о научно-практических достижениях компании в области сварки взрывом [7]. *Князев Денис Юрьевич*, младший научный сотрудник ИГД УрО РАН, поделился опытом применения газогенераторов давления шпуровых (ГДШ) при направленной валке (обрушении) зданий и сооружений. В завершении первого дня конференции *Кутуев Вячеслав Александрович*, научный сотрудник ИГД УрО РАН, сделал доклад на тему «Изучение волновых процессов в горном массиве для обеспечения безопасности охраняемых объектов и устойчивости откосов при ведении взрывных работ на карьерах» [8–10].



Участники выездного научного семинара взрывников на площадке компании НАО «НИПИГОРМАШ» [1]

Participants of the field scientific seminar of shotfirers at the site of NAO NIPIGORMASH [1]

Второй день конференции. Второй день конференции на площадке компании НАО «НИПИГОРМАШ» открыли вручением Почетных грамот Ассоциации «Взрывники Урала» за активное участие в совершенствовании технологии буровзрывных работ на Урале, которыми были награждены:

– *Кутуев Вячеслав Александрович* – научный сотрудник Института горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург;

– *Насретдинов Илшат Ризаевич* – технический директор ЗАО «Ямалтранс-взрыв», г. Екатеринбург;

– *Костромин Виктор Анатольевич* – начальник участка БВР АО «Мариинский прииск», г. Асбест, р.п. Малышева;

– *Осипов Павел Леонидович* – машинист бурового шарошечного станка (СБШ) АО «Невьянский цементник», г. Невьянск.

После награждения горняки обсудили возможности и проблемы применения эмульсионных взрывчатых веществ (ЭВВ) для решения главного вопроса прове-

дения БВР – получения ЭВВ, обеспечивающих заданное качество дробления руды и горных пород в целом.

О направлении работ НАО «НИПИГОРМАШ» рассказал руководитель продаж предприятия *Кичигин Алексей Викторович*. 2022 год оказался очень непростым, но, несмотря на сложности, компания НАО «НИПИГОРМАШ» на сегодняшний день является лидером в горном машиностроении не только в Уральском регионе, но и в Российской Федерации. Предприятие специализируется на разработке, производстве и внедрении широкой линейки современного оборудования для подземных рудников, шахт и для открытых горных работ. Главное достижение – буровые станки, которые начали полностью изготавливать на собственном производстве. Выпуск промышленных образцов запланирован на середину 2023 г. В дальнейшем предприятие будет производить по 12 буровых станков и более 60 смесительно-зарядных машин в год.

Заместитель главного инженера *Лопатин Дмитрий Николаевич* продолжил знакомство с возможностями НАО «НИПИГОРМАШ». Он подробно рассказал о продукции предприятия, подчеркнув, что особое внимание уделяется вопросам автоматизации производства с целью минимального вмешательства человека в технологические процессы. Сегодня специалистами компании осуществляется не только проектирование и изготовление горного оборудования, но и разработка программного обеспечения для него.

Заместитель руководителя группы промышленных взрывчатых веществ (ПВВ) рецептурно-технологического отдела ГосНИИ «Кристалл» (г. Дзержинск, Нижегородская обл.) [11] *Зимин Алексей Сергеевич* ознакомил аудиторию с результатами сравнения основных способов сенсбилизации матричной эмульсии ЭВВ, их преимуществами и недостатками. С этой целью были проведены исследования детонационных характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Порэмита П2», сенсбилизированного микросферами «Expancel 045 DET 60 d25».

В развитие темы детонационного процесса *Горинов Сергей Александрович* рассказал об итогах своих экспериментов по оценке детонации в зависимости от снижения плотности ЭВВ [12].

Флягин Александр Сергеевич, младший научный сотрудник ИГД УрО РАН, поделился опытом разработки технологии испытаний газопроводных труб на прочность, проведенных с применением линейного кумулятивного заряда [13]. В процессе обсуждения представленной работы коллеги Горинов С. А. и Берсенеv Г. П. дали разработчику ряд ценных советов по оптимизации исследований, а также предложили после окончания испытаний опубликовать полученные данные для практической помощи горнякам и промышленникам.

Реготунов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник и эксперт в области промышленной безопасности ИГД УрО РАН, представил результаты сравнительного анализа эксплуатационных свойств буровой шарошечной техники отечественного и импортного производства наиболее известных марок. В целом на текущий момент технические показатели российских образцов оборудования пока в разы ниже их зарубежных аналогов.

Кутуев Вячеслав Александрович, научный сотрудник ИГД УрО РАН, посвятил доклад результатам исследований детонационных характеристик промышленных эмульсионных веществ на примере «Порэмита 1А» и «НПГМ». В результате изучения скорости детонации ЭВВ «Порэмита 1А» в полигонных условиях при диаметре гильзовых зарядов 100 мм сотрудниками Лаборатории РГП ИГД УрО РАН установлены экспериментальная зависимость скорости детонации от плотности и расчетные зависимости ширины зоны химической реакции от

скорости детонации и плотности ЭВВ «Порэмит 1А». Полученные эмпирические и расчетные корреляционные уравнения позволяют на практике с определенной достоверностью определять ширину детонационной зоны и скорость детонации ЭВВ «Порэмит 1А» в зависимости от плотности ВВ [14, 15]. Экспериментально установлена величина оптимальной плотности заряжания для ЭВВ «НПГМ», которая позволяет достигать значений скорости детонации, заявленной производителем ВВ [16, 17].

Волков Владимир Иванович, начальник БВР АО «Полюс Вернинское» (г. Бодайбо, Иркутская обл.) [18] рассказал об опыте применения пластиковых затворов при проведении буровзрывных работ. Испытания показали, что использование подобных затворов повышает эффективность взрывных работ и увеличивает зону регулируемого дробления горных пород без дополнительных затрат.

Берсенева Г. П. подвел итоги двух дней конференции. Наука развивается скачкообразно, когда накапливается критическая масса знаний, происходит качественный скачок. Поэтому особенно важно соответствовать современному уровню научных достижений в такой сложной отрасли, как горная промышленность. Особое внимание нужно уделять своевременному обучению специалистов, особенно взрывников. Сегодня часть опытных взрывников мобилизована в зону боевых действий. В связи с этим руководителям предприятий необходимо обратить внимание на уровень подготовки оставшегося персонала и самостоятельно проводить с ними занятия. Узких мест у нас много, нужно преодолевать их совместно.

Третий день конференции. В заключительный день конференции 24 ноября состоялись две экскурсии. Первая группа горняков отправилась на производственную площадку компании ООО «Протол», где участники конференции познакомились с новым модульным заводом по изготовлению промышленного эмульсионного взрывчатого вещества «Протолит-Э-100» (г. Дегтярск), представители компании «INTEO» [19] по производству оборудования для горной промышленности представили вниманию горняков зарядную машину. Вторая группа направилась в г. Невьянск на АО «Невьянский цементник» и ООО «Невьянское карьероуправление», где участникам удалось посетить известняковый карьер, цех помола и музей предприятия, а также побывать в Демидовском музее и на Невьянской наклонной башне.

Решения конференции. Отметим большой вклад НАО «НИПИГОРМАШ» (г. Екатеринбург) в разработку и производство новых промышленных взрывчатых веществ, зарядных машин и стационарных комплексов по изготовлению эмульсионных ВВ на предприятиях для открытых и подземных горных работ на Урале, в России, ближнем и дальнем зарубежье, а также бурового станка для открытых горных работ.

Подготовить совместно с предприятиями-изготовителями ЭВВ мероприятия по устранению недостатков при производстве ЭВВ и ознакомить с ними потребителей ВВ.

ИГД УрО РАН и Ассоциации «Взрывники Урала» оказать помощь ООО «Протол» в доработке «Логистического центра подготовительных взрывных работ» (г. Дегтярск), а именно пункта по изготовлению ЭВВ и стационарного полигона для испытаний ВВ и сварки металлов взрывом.

Рекомендовать продолжение дальнейшей разработки опытного устройства ИГД-1, обеспечивающего инструментальное измерение параметров процесса шарошечного бурения, позволяющего уточнять прочностные характеристики горного массива.

Материалы семинара традиционно опубликовать в ежегодном издании «Технология и безопасность взрывных работ» (I квартал 2023 г.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Завод горно-шахтного оборудования НАО «НИПИГОРМАШ». URL: <https://npgm.ru/> (дата обращения: 03.03.2023).
2. Многопрофильная компания ООО «Протол». URL: <https://protol.ru/> (дата обращения: 03.03.2023).
3. АО «Невьянский цементник» – производитель цемента европейского качества с вековым опытом. URL: <https://cemros.ru/cntnt/rus/production3/zavody1/rossiya/cementniy.html> (дата обращения: 03.03.2023).
4. Государственное автономное учреждение культуры Свердловской области «Невьянский государственный историко-архитектурный музей». URL: <https://невьянскиймузей.рф/> (дата обращения: 03.03.2023).
5. ООО «Уральский Сибирит». URL: <http://www.uralsibirit.ru/> (дата обращения: 03.03.2023).
6. ФБГУН Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова Российской Академии наук (ИПКОН РАН). URL: <https://ипконран.рф/> (дата обращения: 03.03.2023).
7. Бесшапошников Ю. П., Берсенеv Г. П. Сварка металлов взрывом // Проблемы недропользования. 2022. № 3. С. 55–65. DOI: 10.25635/2313-1586.2022.03.055
8. Жариков С. Н., Кутуев В. А. Анализ сейсмического эффекта в различных породах и грунтовых условиях // ГИАБ. 2020. № 12. С. 44–53. DOI 10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53
9. Жариков С. Н., Кутуев В. А. Построение номограммы для определения параметров БВР в приконтурной зоне карьера // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 3. С. 161–171. DOI: 10.25635/r0915-0037-0746-z
10. Кутуев В. А., Жариков С. Н. Влияние взрывных работ на газопровод высокого давления, расположенный в границах горного отвода // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 3. С. 50–60. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-50-60
11. АО «ГосНИИ «Кристалл». URL: <https://zvezdakachestva.ru/kompanii/ao-%C2%ABgosnii-%C2%ABkristall%C2%BB/> (дата обращения: 03.03.2023).
12. Горинов С. А., Маслов И. Ю. Особенности детонации низкоплотного эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного легкими малопрочными гранулами // ГИАБ. 2014. № S2-2. С. 18–48.
13. Меньшиков П. В., Флягин А. С., Таранжин С. С. Опыт применения линейного кумулятивного заряда для инициирования зарождения трещин в испытуемых трубах при проведении натуральных полигонных пневматических испытаний // Взрывное дело. 2022. № 136-93. С. 169–188.
14. Кутуев В. А. Изучение детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэмит-1А с использованием регистратора данных «DATATRAPI™» // ГИАБ. 2016. № S21. С. 101–109.
15. Меньшиков П. В., Жариков С. Н., Кутуев В. А. Определение ширины зоны химической реакции промышленного эмульсионного взрывчатого вещества порэмит 1А на основе принципа неопределенности в квантовой механике // ГИАБ. 2021. № 5-2. С. 121–134. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_121
16. Кутуев В. А., Флягин А. С., Жариков С. Н. Исследование детонационных характеристик ПЭВВ НПГМ с различными исходными компонентами эмульсии при инициировании зарядов разными промежуточными детонаторами // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 3. С. 175–187. DOI: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181
17. Флягин А. С., Кутуев В. А., Жариков С. Н. Экспериментальное исследование детонационных характеристик промышленного эмульсионного взрывчатого вещества НПГМ производства НАО «НИПИГОРМАШ» // Проблемы недропользования. 2020. № 4(27). С. 23–31. DOI: 10.25635/2313-1586.2020.04.023
18. АО «Полнос Вернинское». URL: https://polyus.com/ru/operations/operating_mines/verninskoe/ (дата обращения: 03.03.2023).
19. Инжиниринговая компания INTEO ООО «Инженерно-технический офис». URL: <https://inteo.top/#service-body-21> (дата обращения: 03.03.2023).

Поступила в редакцию 21 февраля 2023 года

Сведения об авторах:

Берсенеv Геннадий Порфирьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела УрО РАН, генеральный директор Ассоциации «Взрывники Урала». E-mail: victoria508@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6192-4029>

Кутуев Вячеслав Александрович – научный сотрудник Института горного дела УрО РАН. E-mail: 9634447996@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

Results of the 9th Research and Practice Conference of the Ural Shotfirers

Gennadii P. Bersenev¹, Viacheslav A. Kutuev¹

¹ Institute of Mining UB RAS, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

The article presents the results of the research and practice conference on mining and blasting in the Urals which was organized by the Institute of Mining and the Ural Association of Shotfirers (Vzryvniki Urala) within the framework of the 10th Ural Mining Forum at the IEC Ekaterinburg-EXPO with a field meeting at NAO NIPIGORMASH and tours to the OOO Protol production site, Nevyansky Tsementnik JSC, OOO Nevyanskoe karieroupravlenie, Demidov Museum, and the Leaning Tower of Nevyansk. Scientific reports and presentation on safe subsoil use and blasting were heard at the conference; special blasting work of explosion welding and building collapse in construction were addressed; the latest developments of domestically produced charging and drilling equipment and emulsion explosives were presented; reports were given on the studies of seismic safety of open pit secure facilities and benches in the course of open-pit mining.

Keywords: research and practice conference; Institute of Mining UB RAS; Ural Association of Shotfirers; Vzryvniki Urala; industrial safety; drilling and blasting; special blasting; emulsion explosives; detonation characteristics.

REFERENCES

1. Mining equipment plant NAO NIPIGORMASH. Available from: <https://npgm.ru/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
2. Multi-business company OOO Protol. Available from: <https://protol.ru/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
3. Nevyansky Tsementnik JSC, a European quality cement manufacturer with a century's experience. Available from: <https://cemros.ru/cnnt/rus/production3/zavody1/rossiya/cementniy.html> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
4. State autonomous cultural institution of the Sverdlovsk region Nevyansk State Historical and Architectural Museum. Available from: <https://невянскиймузей.рф/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
5. OOO Uralskii Sibir. Available from: <http://www.uralsibir.ru/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
6. FSBI Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources (IPKON RAS) named after Academician N. V. Melnikov. Available from: <https://ипконран.рф/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
7. Besshaposhnikov Iu. P., Bersenev G. P. Welding of metals by explosion. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2022; 3: 55–65. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2022.03.055
8. Zharikov S. N., Kutuev V. A. Seismic effects in different rocks and soil. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2020; 12: 44–53. (In Russ.) Available from: doi: 10.25018/0236-1493-2020-12-0-44-53
9. Zharikov S. N., Kutuev V. A. Construction of a nomogram for determining the parameters of DBwin the pit's contour zone. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2020; 3: 161–171. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/r0915-0037-0746-z
10. Kutuev V. A., Zharikov S. N. The effect of blasting on a high-pressure gas pipeline located within the borders of a mine take. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2020; 3: 50–60. (In Russ.) Available from: doi: 10.21440/0536-1028-2020-3-50-60
11. GosNII Kristall OJSC. Available from: <https://zvezdakachestva.ru/kompanii/ao-%C2%ABgosnii-%C2%ABkristall%C2%BB/> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)
12. Gorinov S. A., Maslov I. Iu. Features of detonation of a low-density emulsion explosive sensitized by light weak granules. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2014; S2-2: 18–48. (In Russ.)
13. Menshikov P. V., Fliagin A. S., Taranzhin S. S. Experience of using a linear shaped charge to initiate the initiation of cracks in tested pipes during full-scale pneumatic tests. *Vzryvnoe delo = Explosion Technology*. 2022; 136-93: 169–188. (In Russ.)
14. Kutuev V. A. The study of detonation characteristics of industrial explosives emulsion Poremit-1a, using the data logger "DATATRAP II™". *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-*

tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal). 2016; S21: 101–109. (In Russ.)

15. Menshikov P. V., Zharikov S. N., Kutuev V. A. Determination of chemical reaction zone width for emulsion explosive Poremit 1A based on uncertainty principle of quantum mechanics. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2021; 5-2: 121–134. (In Russ.) Available from: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_121

16. Kutuev V. A., Fliagin A. S., Zharikov S. N. Investigation of detonation characteristics of an emulsion explosive NPGM with different initial components of the emulsion when initiating charges with different intermediate detonators. *Izvestiia Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle = Proceedings of the Tula State University. Earth Sciences*. 2021; 3: 175–187. (In Russ.) Available from: doi: 10.46689/2218-5194-2021-3-1-169-181

17. Fliagin A. S., Kutuev V. A., Zharikov S. N. Experimental study of detonation characteristics of industrial emulsion explosives npgm produced by company NPIGORMASH. *Problemy nedropolzovaniia = The Problems of Subsoil Use*. 2020; 4(27): 23–31. (In Russ.) Available from: doi: 10.25635/2313-1586.2020.04.023

18. PJSC Polyus Verninskoe. Available from: https://polyus.com/ru/operations/operating_mines/verninskoe/ [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)

19. Engineering company INTEO OOO Inzhenerno-tekhnicheskii ofis. URL: <https://inteo.top/#service-body-21> [Accessed 03 March 2023]. (In Russ.)

Received 21 February 2023

Information about the authors:

Gennadii P. Bersenev – PhD (Engineering), senior researcher, Institute of Mining UB RAS, Director General of the Ural Association of Shotfirers (Vzryvniki Urala). E-mail: victoria508@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6192-4029>

Viacheslav A. Kutuev – researcher, Institute of Mining UB RAS. E-mail: 9634447996@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-8423-0246>

Для цитирования: Берсенеv Г. П., Кутуев В. А. Итоги IX научно-практической конференции взрывников Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2023. № 3. С. 127–133. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-127-133

For citation: Bersenev G. P., Kutuev V. A. Results of the 9th Research and Practice Conference of the Ural Shotfirers. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering*. 2023; 3: 127–133 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2023-3-127-133

В журнале публикуются статьи по следующим группам специальностей научных работников

2.3. Информационные технологии и телекоммуникации

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

2.3.7. Компьютерное моделирование и автоматизация проектирования

2.5. Машиностроение

2.5.2. Машиноведение

2.5.3. Трение и износ в машинах

2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

2.5.6. Технология машиностроения

2.5.10. Гидравлические машины, вакуумная, компрессорная техника, гидро- и пневмосистемы

2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

2.8. Недропользование и горные науки

2.8.1. Технология и техника геологоразведочных работ

2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

2.8.7. Теоретические основы проектирования горнотехнических систем

2.8.8. Геотехнология, горные машины

2.8.9. Обогащение полезных ископаемых

2.8.10. Охрана труда, промышленная безопасность, безопасность в чрезвычайных ситуациях (недропользование)

Р е д а к ц и я
Главный редактор Н. Г. Валиев
Зам. главного редактора Ю. И. Лель, А. Г. Шорин
Ответственный секретарь Н. В. Георгиева
Редакторы Л. Г. Соколова, А. А. Зайкова,
М. О. Горбова

Перевод И. В. Шайхутдиновой

Компьютерная верстка Ю. Б. Швецово

Подп. в печать 30.05.2023. Дата выхода в свет 20.06.2023
Формат 70 × 108 1/16. Печать офсетная
8,5 усл. печ. л., 8,2 уч.-изд. л. Тираж 500 экз. Заказ 7656
Цена свободная

Издатель ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»
620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, 30

Редакция «Известия вузов. Горный журнал»
г. Екатеринбург, пер. Университетский, 7, к. 4101
тел. (факс) (343) 257-65-59, (343) 283-04-29
E-mail: gornij_journal@ursmu.ru ; journal@m.ursmu.ru
<http://www.mining-science.ru>

Типография ООО «Издательство УМЦ УПИ»
620078, г. Екатеринбург, ул. Гагарина, 35а, оф. 2

ISSN 0536-1028.

Известия высших учебных заведений.

Горный журнал, № 3, 2023.